

Methode zur Eigenschaftsdarstellung von Laserstrahlschweißnähten im Karosseriebau

Von der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden
zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Paul-Michael Mickel

geb. am 27. April 1966 in Berlin

Tag der Einreichung: 29. September 2011

Tag der Verteidigung: 15. November 2012

Gutachter:

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Vorsitzender der Promotionskommission:

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. A. Hurtado

Kurzfassung

Das Laserstrahlschweißen im Karosseriebau ist zu einem konventionellen Fügeverfahren geworden. Dies gilt unabhängig von der Art der Strahlquelle, der Strahlführung und für die gesamte Sicherheits-, Steuerungs-, Automatisierungs- und Vorrichtungstechnik. Mehr und mehr Baugruppen sind speziell für die Laserverfahren konstruiert, nutzen deren spezifischen Eigenschaften gezielt aus und können nicht mehr mit anderen Fügeverfahren hergestellt werden.

Unterschiedliche Schweißnaht-Merkmale sind nicht durch die Lasertechnik verursacht, sondern zumeist in ungünstigen Spannbedingungen oder Bauteil-, Werkstoff- oder Beschichtungsabweichungen begründet. Trotz der hohen Präzision aller Fertigungskomponenten treten durch die Sensibilität des Fügeprozesses bedingte systematische und stochastische Nahtunregelmäßigkeiten auf. Systematisch erkennbare Ursachen sind die wenigen hundertstel bis zehntel Millimeter Bauteilgeometrie-, Positions- oder Beschichtungsabweichungen bzw. Toleranzen, deren umfassende Beherrschung noch aussteht. Unabhängig davon treten scheinbar zufällige Unregelmäßigkeiten trotz allseits optimaler Bedingungen auf.

Im Ergebnis dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, um aus Prozesssignalen mit einer erstaunlich einfachen Vorgehensweise entstandene Schweißnahtmerkmale zu prognostizieren. Die Merkmalseinteilung lehnt sich an der maßgeblichen Prüfvorschrift an und erreicht schon in dieser frühen Entwicklungsphase einen guten bis sehr guten Bewertungsgrad.

Begründet und untermauert wird diese Methode mit der Erweiterung der bestehenden Modellvorstellung zur Laserstrahl-(Stahl)Werkstoff-Wechselwirkung vom Einschweißen zum Verschweißen der Nahtform I-Naht am 2-Blech Überlappstoß verzinkter Bleche. Die Vorgänge im Schweißprozess für jedes prognostizierbare Nahtmerkmal sind skizziert, begründet und mit den Prozessemissionen in Zusammenhang gebracht.

Abstract

The laser welding in the car body shop has become a conventional joining process. This is independent from the type of the laser beam source, the course of the radiation and for the complete safety-, control-, automation- and equipment-technology. More and more modules are especially designed for the laser procedure, use their specific characteristics and cannot be produced by any other joining processes.

Different characteristics of welds are not caused by the laser technique, but mostly due to unfavourable clamping conditions or because of tolerances of parts, material or coating. Despite the big precision of all production components, systematic and stochastic welding imperfections appear due to the sensibility of the joining process. Systematically identifiable causes are the deviations or tolerances of a few hundredths to tenths of a millimetre concerning the component's geometry, positions and coatings, whose complete control is still due. Independent from that appear seemingly random irregularities, despite the well-optimal conditions.

In result to this work, a method for pre-calculating welding characteristics through an amazingly simple approach was developed. The classification is based on the test specification and achieved even at this early stage of development a good or very good rating level.

This method is justified and supported through the addition of the already existing image of the model to the laser/material interaction; from weld-in to the weld-together of square butt form-seams on 2 zinc coated sheets lap joint. The transactions within the welding process for each pre-calculated seam-characteristic are outlined, justified and related to the process emissions in context.

Vorwort

Diese Dissertation entstand durch meine Tätigkeiten in der Serienplanung Karosseriebau des Fahrzeugwerkes Zwickau der Volkswagen Sachsen GmbH. Die inhaltliche Anregung für die Arbeit basiert auf den bearbeiteten Forschungsprojekten der „Maschinen- und Automobilbau-Initiative Next Economy“, durch die Anforderungen und Erfahrungen aus der Fahrzeugfertigung und durch die Untersuchungen an zahlreichen Laserschweißnähten. Im Ergebnis wurde die Anwendbarkeit der Inprozess-Laserschweißnaht-Merkmalüberwachung wissenschaftlich fundiert weiterentwickelt.

Für die Initial- und stetige Zwischenmotivation gilt mein besonderer Dank Dr. Günter Michel. Die mehreren tausend Proben wären nicht möglich gewesen ohne meinen Kollegen Jens Krause, der für jede Versuchsreihe und Schweißnaht die Anlagentechnik exakt programmierte. Ebenso danke ich meinen Kollegen in der Volkswagen Sachsen Karosseriebau-Qualitätssicherung, der Fügetechnik im Werk Wolfsburg und den Projektpartnern der Forschungsprojekte, insbesondere Renald Schedewy und Michael Kuhl aus den Fraunhofer Instituten für die anregenden Gespräche, ihren Ideenreichtum und die allzeit gute Zusammenarbeit.

Die guten Arbeitsbedingungen in der Volkswagen Sachsen GmbH und die Gewährung bester Forschungsbedingungen waren hervorragende organisatorische Voraussetzungen für das Erreichen gesetzter Ziele. Umfangreiche fachliche Unterstützung und zahlreiche konstruktive Hinweise zum Erstellen der Arbeit erhielt ich von Dr. Jens Standfuß vom Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden. Herrn Prof. Eckard Beyer vom Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik der TU Dresden danke ich für die Übernahme der universitären Begleitung.

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen. Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Publications about the content of this work require the written consent of Volkswagen AG. The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen AG.

Inhalt

1	<i>Einleitung</i>	1
2	<i>Stand der Technik</i>	3
2.1	Laserstrahlen im Karosseriebau	3
2.1.1	Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volkswagen	5
2.1.2	Golf, Passat, Phaeton und Bentley Fertigung bei Volkswagen Sachsen	6
2.1.3	Prozessbesonderheiten beim Laserstrahlschweißen im Karosseriebau	9
2.1.4	Entwicklungstendenzen der Laseranwendung im Karosseriebau.....	11
2.2	Qualitätssicherungsmethoden für Laserfügeverbindungen im Karosseriebau	14
2.2.1	Offline Prüfung	14
2.2.2	Inline Prüfung.....	19
2.2.3	Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen	23
3	<i>Nahteigenschaften</i>	27
3.1	Übersicht der Nahtunregelmäßigkeiten	27
3.2	Einflüsse auf Nahteigenschaften	27
3.3	Thermische Verformung, Schrumpfung, Eigenspannungen, Verzug	30
4	<i>Problemstellung, Zielsetzung und Systematik zur Lösungsfindung</i>	32
4.1	Problemstellung	32
4.2	Zielsetzung	33
4.3	Systematik zur Lösungsfindung	33
5	<i>Durchgeführte Untersuchungen</i>	34
5.1	Basistechnik	34
5.1.1	Laserstrahlquelle	34
5.1.2	Bearbeitungswerkzeug und Sensoren.....	34
5.1.3	Kamera	36
5.1.4	Spektrale Einordnung und Sichtbereiche der Sensoren	38
5.1.5	Laserzelle und Roboter.....	40
5.2	Inprozess Untersuchungen – Schwerpunkt Photodetektoren	40
5.2.1	Analyse Toleranzbandmethode	40
5.2.2	Statistische Analyse von Einflussgrößen.....	43
5.2.3	Einzelanalyse der Einflussgröße Spalt	49
5.2.4	Spaltverträglichkeit dünner Strukturbleche	52
5.2.5	Einführung der MILLIMETERPEGEL	54
5.3	Inprozess Untersuchungen – Schwerpunkt Prozessbildbewertung	58

5.3.1	Analyse LWM-C.....	58
5.3.2	Messung der Dampfkapillare und der Schmelzbadlänge	70
5.3.3	Off-axis Prozessbeobachtung.....	71
5.3.4	Charakterisierung der Durchschweißung.....	72
5.3.5	Auslegung geeigneter Schweißprozessbeleuchtung.....	75
5.3.6	Koaxiale und off-axis Beobachtungen	79
6	<i>Nahteigenschafts-Bewertungsmethode</i>	86
6.1	Vorgehensweise	86
6.2	Durchgangslöcher, Poren, Endkrater	95
6.3	Aussagesicherheit	95
7	<i>Modellbildung</i>	97
7.1	Anfang und Ende der Schweißnaht.....	98
7.2	Nahtmerkmal „Spritzer“ (0-Spaltschweißen)	99
7.3	Nahtmerkmal „In Ordnung“	102
7.4	Nahtmerkmal „Geringer Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“	104
7.5	Nahtmerkmal „Starker Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“	106
7.6	Nahtmerkmal „Oben geschnitten“	108
7.7	Nahtmerkmal „Falscher Freund“ (nicht verschweißt).....	110
8	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	112
9	<i>Verzeichnisse</i>	115
9.1	Literatur.....	115
9.2	Normen.....	124
9.3	Abkürzungen	125
9.4	Formelzeichen.....	127
9.5	Abbildungen	127
10	<i>Anlagen</i>	132
10.1	Nahtunregelmäßigkeiten an Laserschweißnähten	132
10.2	Sensor-Fehler-Übersicht.....	137
10.3	Fehler-Ursachen-Parameter.....	139
10.4	Arbeitsplan – Versuchsabfolge und Resultate.....	141

1 Einleitung

Der Karosseriebau ruht nie. Nicht in der Nacht, nicht in den Werksferien und kaum an Wochenenden oder Feiertagen. Besonders deutlich gilt diese Tatsache für die hoch automatisierte Massen-Karosseriefertigung in der kompakten Mittelklasse mit Tagesstückzahlen > 1000 Fahrzeuge je Arbeitstag und mehreren Fahrzeugtypen je Fertigungslinie.

Wenn jedoch nicht 365 Tage im Jahr rund um die Uhr produziert wird, was passiert in den produktionsfreien Zeiten? Die Fahrzeuge und die Fertigungsanlagen „leben“. Sie werden auch innerhalb einer Fahrzeuggeneration ständig optimiert. Nach dem Anlauf eines neuen Produktes werden weitere Optionen und Varianten dieses Typs schrittweise in die Produktion aufgenommen und später können weitere Produktpflegemaßnahmen erfolgen. Detailänderungen an den Produkten, Änderungen der Fertigungsfolgen oder sogar der Fertigungstechnologie zur Kostenminimierung werden durchgeführt. An neuralgischen Punkten in der Prozesskette werden Maßnahmen zu Taktzeitreduzierungen mit dem Ziel der Erhöhung der Stückzahlausbringung und Maßnahmen zur Sicherstellung der Verfügbarkeit durchgeführt. Vorbeugende und außerplanmäßige Instandhaltungsarbeiten an den hochkomplexen Anlagen finden statt und sind von hoher Priorität.

Bereits lange vor dem Ende eines Produktzyklus beginnen die Vorbereitungen für den Produktionsanlauf des Nachfolgetyps. Das kann wiederum Änderungen bzw. Umbaumaßnahmen in den Produktionsanlagen bis hin zur kompletten Verlagerung von Teilanlagen innerhalb eines Werkes oder zu anderen Standorten bedeuten.

Unerlässlich wird somit in der produktionsfreien Zeit im Fahrzeugwerk umgebaut und verbessert. Kostenreduzierung unter Beibehaltung oder Verbesserung des hohen Qualitätsanspruches sind zentrale Aufgabenstellungen.

Mit der Einführung der verschiedenen Laserfügetechnologien in den Karosseriebau bestand und besteht auch in diesem Arbeitsfeld Optimierungsbedarf. In den vergangenen Jahren wurden die Prozesstechniken immer mehr verbessert, Schwachstellen und Ausfallursachen konsequent beseitigt. Laserstrahlquellen und Strahlführungssysteme (Lichtwellenleiter, LWL) sind redundant vorhanden, Laserbearbeitungsoptiken arbeiten zuverlässiger und sind dank konsequenter und richtiger Wartung sehr langlebig.

Bei der direkten Qualitätsbewertung der Laserstrahlnähte im Karosseriebau wurde zunächst auf die bewährten Abläufe und Verfahren gesetzt. Die Serienfreigabe des Laserprozesses vorausgesetzt, werden in regelmäßigen Abständen (zyklisch) die gefügten Baugruppen aus der Fertigung ausgeschleust und die relevanten Qualitätseigenschaften bewertet. Die Bewertung der Lasernähte erfolgt als Sichtprüfung, als zerstörende Meißelprüfung und durch Anfertigung metallurgischer Schliffe. Der Abgleich der Nahtfestigkeit erfolgt durch die Ermittlung der Scherzugfestigkeit in Zerreißmaschinen. Die Proben dafür werden aus originalen Bauteilen herausgeschnitten.

Die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung, die bei den Widerstandsschweißpunkten genutzt wird, ist bei Lasernähten nicht einsetzbar. Die Röntgenprüfung wird nur in Ausnahmefällen eingesetzt. Etabliert in der Serienfertigung hat sich die Thermografie für die Überprüfung der Verbindung bei Überlappnähten. Mit der Thermografie können zwar zerstörungsfrei dennoch nur einige Baugruppen der Tagesproduktion geprüft werden. Die ermittelbaren Nahteigenschaften sind durch die manuelle Sichtprüfung zu ergänzen, außerdem ist die Zugänglichkeit nicht für jede Naht für das Verfahren gegeben.

Deshalb wurden durch die Systemanbieter Techniken entwickelt, welche den direkten Schweißprozess beobachten, Daten daraus aufzeichnen, verarbeiten, auswerten und qualitative Prognosen erlauben. Der Hauptvorteil ist die mögliche 100 % Überwachung unmittelbar während der Fertigung. Nachteilig sind die noch immer vorhandenen Mehrdeutigkeiten der Ergebnisse und die

nicht exakt vorhandene Zuordnung der ermittelten Signale zu den entstandenen Nahteigenschaften.

Der Einsatz von Prozessüberwachungssystemen mit genauen Bewertungsergebnissen hat demzufolge dort Kostenvorteile, wo zerstörende Prüfungen mit allen verbundenen Aufwendungen ersetzt oder Qualitätsregelkreise so beschleunigt werden, dass Nacharbeitsaufwendungen minimiert werden.

Das Ziel der Überlegungen und Untersuchungen für diese Arbeit bestand in der Bewertung und Analyse der aus dem Laserprozess gewinnbaren Signale und deren Zuordnung zu Ereignissen und Ergebnissen in der Schmelze und den entstandenen Schweißnähten. Die digitale Abbildung der Prozessergebnisse soll die Bewertung von Laserstrahlschweißnähten nach heranzuziehenden Normen und Prüfvorschriften gestatten. Die Arbeit orientiert sich an den technologischen Erfordernissen des Automobilbaus und deren Zulieferindustrie. Durch die Spezialisierung auf den Karosseriebau wurden vorrangig lasergeschweißte I-Nähte am Stoß von 2- und 3-Stahlblechüberlappungen untersucht.

Damit ist es nun möglich, die Vorgänge in der Schweißnaht, dem Keyhole und der Schmelze besser zu verstehen und die Zuordnung zu möglichst einfach und reproduzierbar erfassbaren Emissionsgrößen durchzuführen.

Als Nebenergebnis aus den durchgeführten Untersuchungen und den Erfahrungen im Karosseriebau werden die Anforderungen an zu schaffende Prüf- bzw. Überwachungssysteme, an die eingesetzten Sensoren, die Integration in vorhandene und zu schaffende Steuerungs- und Automatisierungsstrukturen formuliert.

Die Nahtqualität im Sinne der durchgeführten Arbeiten sind die entstandenen Eigenschaften einer erzeugten Laserstrahlschweißverbindung. Es wird vorausgesetzt, dass bereits bei der Konstruktion der Schweißbaugruppen, bei der Wahl der Werkstoffe und Beschichtungen und bei der Wahl des Fügeverfahrens und der Festlegung der Prozessparameter physikalische, chemische und metallurgische Qualitäten ermöglicht wurden. So wird die grundsätzliche Schweißbarkeit der verwendeten Werkstoffe als gegeben betrachtet. Der wärmebehandelnde Einfluss des thermischen Laserschweißprozesses auf Gefügeeigenschaften und -strukturen wird nur tangiert.

2 Stand der Technik

2.1 Laserstrahlen im Karosseriebau

Abbildung 2-1 bis Abbildung 2-3 verdeutlichen, dass Laserapplikationen im Karosseriebau keine exotische Technologie mehr sind. Das Laserstrahlschweißen ist in der Serienproduktion etabliert und zählt hier bereits zu den klassischen Fügeverfahren.

Der Weg hierher begann in den 1980er Jahren mit leistungsfähigen CO₂-Lasern für zweidimensionale Platinenzuschnitte. Im folgenden Jahrzehnt wurde die Tailor Welded Blank (TWB) Technologie entwickelt und in der Zulieferindustrie etabliert [1], [2]. Um die Jahrtausendwende wurde diese Technologie von Stahlblech-Anwendungen zu Leichtmetall TWB übertragen [3].

Erste 3-D-Anwendungen im Karosseriebau waren Dachnahtschweißungen mit CO₂ –Laser-Portalanlagen und CO₂ – Laser+6-Achsroboter mit Strahlrohrführungen [4], [5]. Mit der Verfügbarkeit von 4 kW Festkörperlasern und deren flexibler Strahlführung per Lichtleitfaser wurden die dreidimensionalen Einsatzfelder wesentlich erweitert. Volkswagen mit dem Golf 5 und Audi mit dem A2 waren die Hersteller mit der höchsten Anzahl von Laserstrahl-Fügeoperationen direkt an den Rohkarossen von Großserienfahrzeugen.

Den positiven Einfluss von Laserfügeverbindungen auf Produkteigenschaften zeigen die Anwendungen zum Fügen von A-Säulen und Schwellern bei BMW und Volvo Cabriolets [5], [6]. Laserbedingte Konstruktionsvorteile für Cabriolet Dachkonstruktionen sind in [7] beschrieben.

Eine Sonderrolle spielt das Laserstrahlhartlöten und Laserschweißen von Außen(haut)blechen im Sichtbereich als Gestaltungsmöglichkeit. Populäre Beispiele sind Heckklappen mit äußeren Laserschweißnähten einiger Modelle von Audi [8], BMW [9], Daimler (z. B. Heckklappe vom Typ W204) und Volkswagen.

Breit durchgesetzt haben sich die Laserfügetechniken zum Schweißen und Löten von Dachnähten (z.B.: Audi, Ford [10], Hyundai [11], Renault [12], [13], Volkswagen, Volvo [14]). Bei der Fertigung von Anbauteilen (Motorhauben, Heckklappen, Türen) setzen zahlreiche Hersteller auf die Laserfügetechnik. Für Stahlblechkonstruktionen kommen neben drahtgeführten Laserschweißwerkzeugen (Schweißoptik bzw. Schweißkopf) immer öfter Remote Schweißanlagen zum Einsatz (siehe auch 2.1.4.2). Etabliert ist auch das Laserschweißen mit Zusatzwerkstoff von Anbauteilen aus Aluminium. (z.B. BMW [15]; Fiat, Renault [16]; Nissan [17], [18]; Hyundai [19]; Fiat [20]; Peugeot [21])

Ein Anwendungsbeispiel der Laserfügetechnik für die innere Ventilator- und Kühler-Tragstruktur für Fahrzeuge auf dem nordamerikanischen Markt wurde in [22] präsentiert.

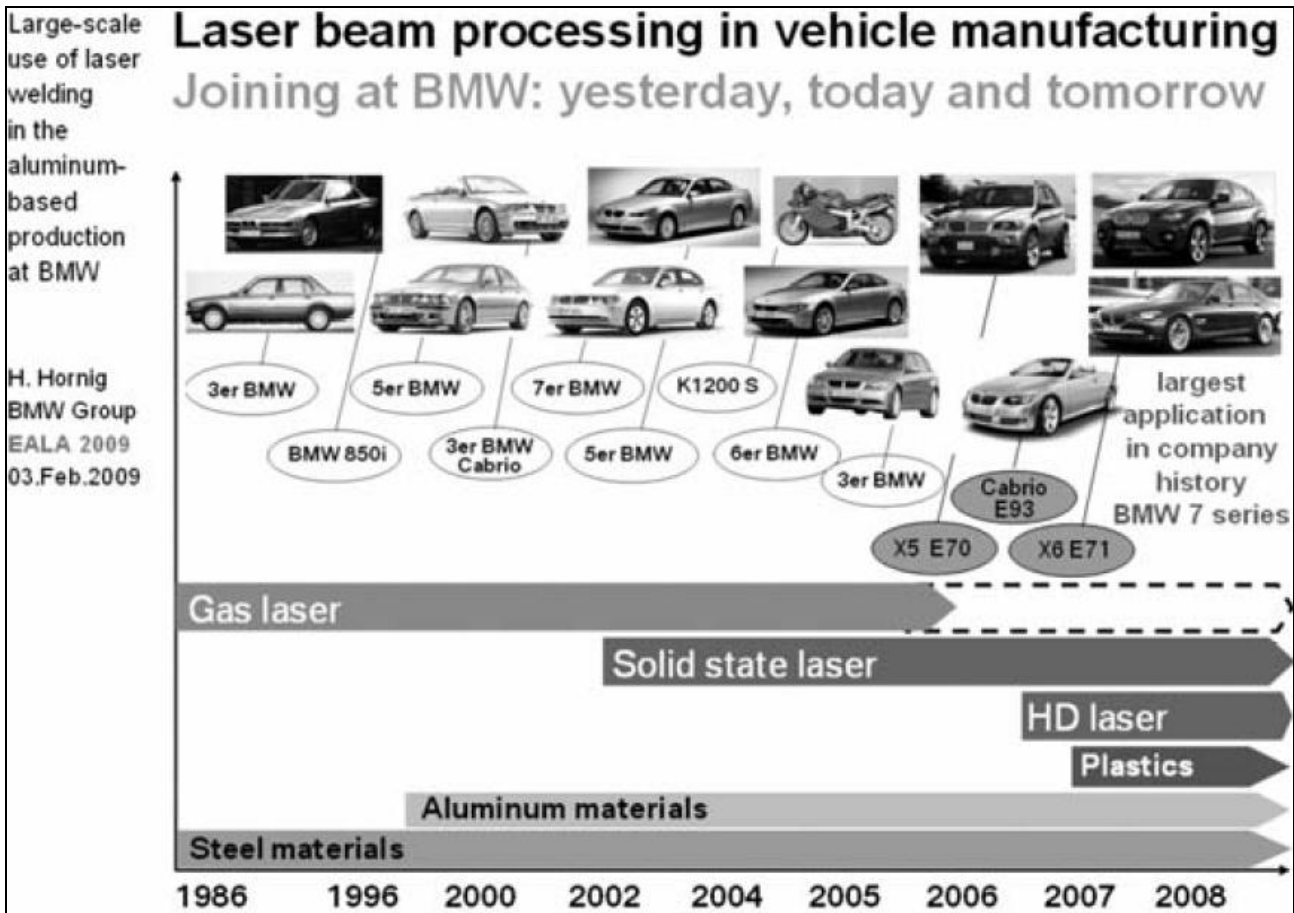


Abbildung 2-1 Geschichte der Laseranwendungen im Karosseriebau bei BMW [15]

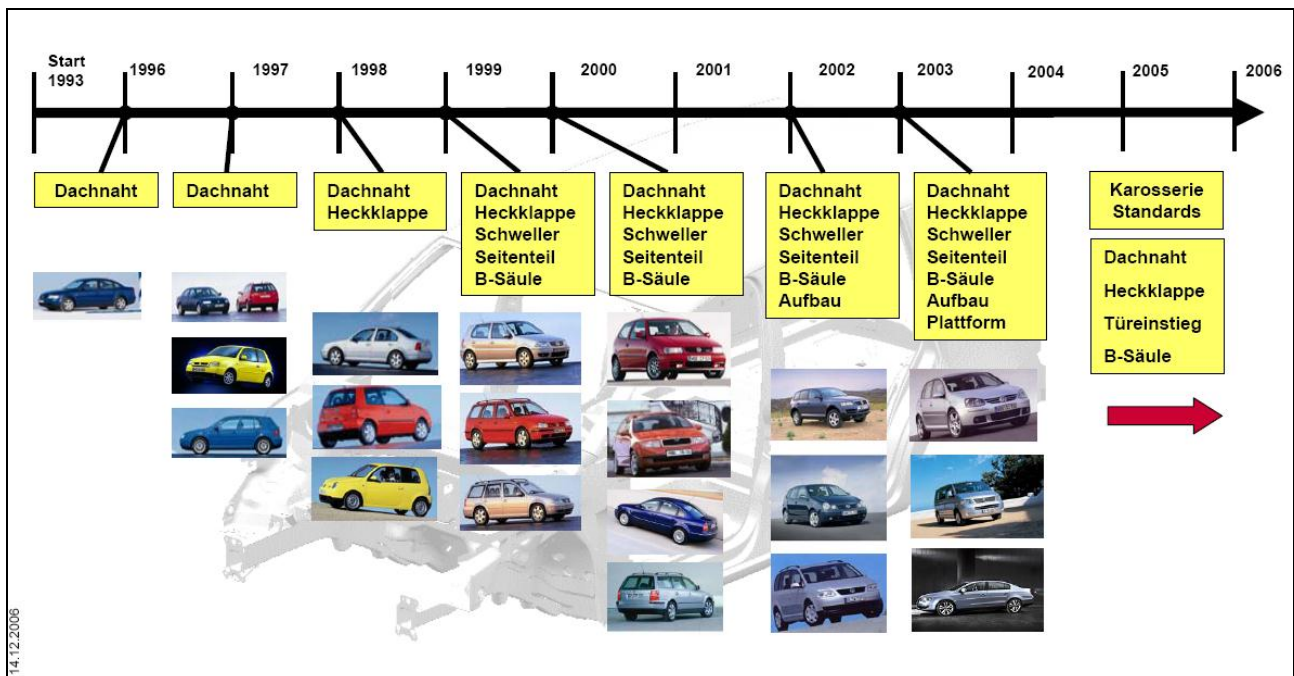


Abbildung 2-2 Geschichte der Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volkswagen [Volkswagen AG, P1K/F]

Laser Implementation at Volvo

- Investment
- Existing Flexlines

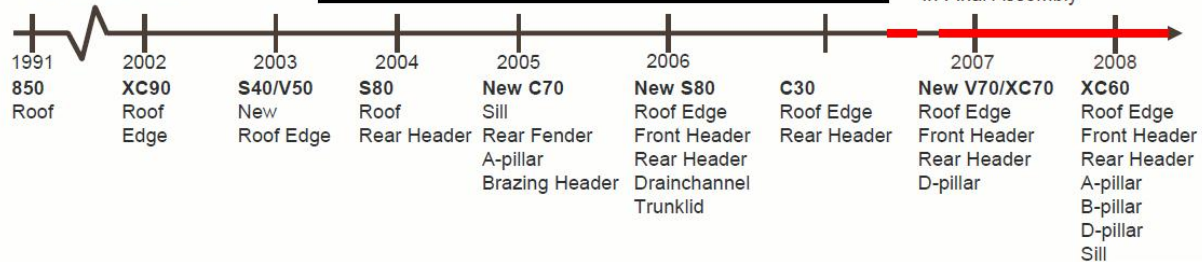
- + Design Freedom
- + Properties
- + Flexibility
- + Availability



Welding
Reduced Bodyside
A-pillars
Robotised Remote

Brazing
A-pillars
Rear openings
Body Side
Roof

Cutting
Rails
McPherson
GPS antenna
In Final Assembly



Johnny K Larsson & Niclas Palmquist
Issue date: 2009-02-04, Security Class: Open
Page 12



Abbildung 2-3 Geschichte der Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volvo [14]

2.1.1 Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volkswagen

Die lasertypischen Fertigungsmöglichkeiten wie einseitig ausreichende Zugänglichkeit, programmierbare Flexibilität, erweiterte Designmöglichkeiten und hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten sind Selbstverständlichkeit. Die per Laser-Hartlöten erzeugte Dachnaht im Sichtbereich zwischen Dach und Seitenteil-Außenhaut wird inzwischen von weiteren Fahrzeugherstellern angewendet. Die Verbindungsflanschbreiten wurden stetig weiter reduziert. Bei den Stahltüren des Audi A4 erlauben die 4 mm Flanschüberdeckung kein alternatives Widerstandspunktschweißen (WPS) mehr [23]. Den Anforderungen aus der Karosserie Großserienfertigung von Zykluszeiten < 60 s und einer technischen Verfügbarkeit > 90 % sind die Laserstrahlquellen, deren Peripherie und die zugehörige Anlagentechnik gewachsen.

Der in Wolfsburg gefertigte Touran ist derzeit das Fahrzeug mit der größten Laserstrahlnahtlänge im Karosseriebau (60 m [24]) eines Großserienfahrzeuges weltweit (Abbildung 2-4).

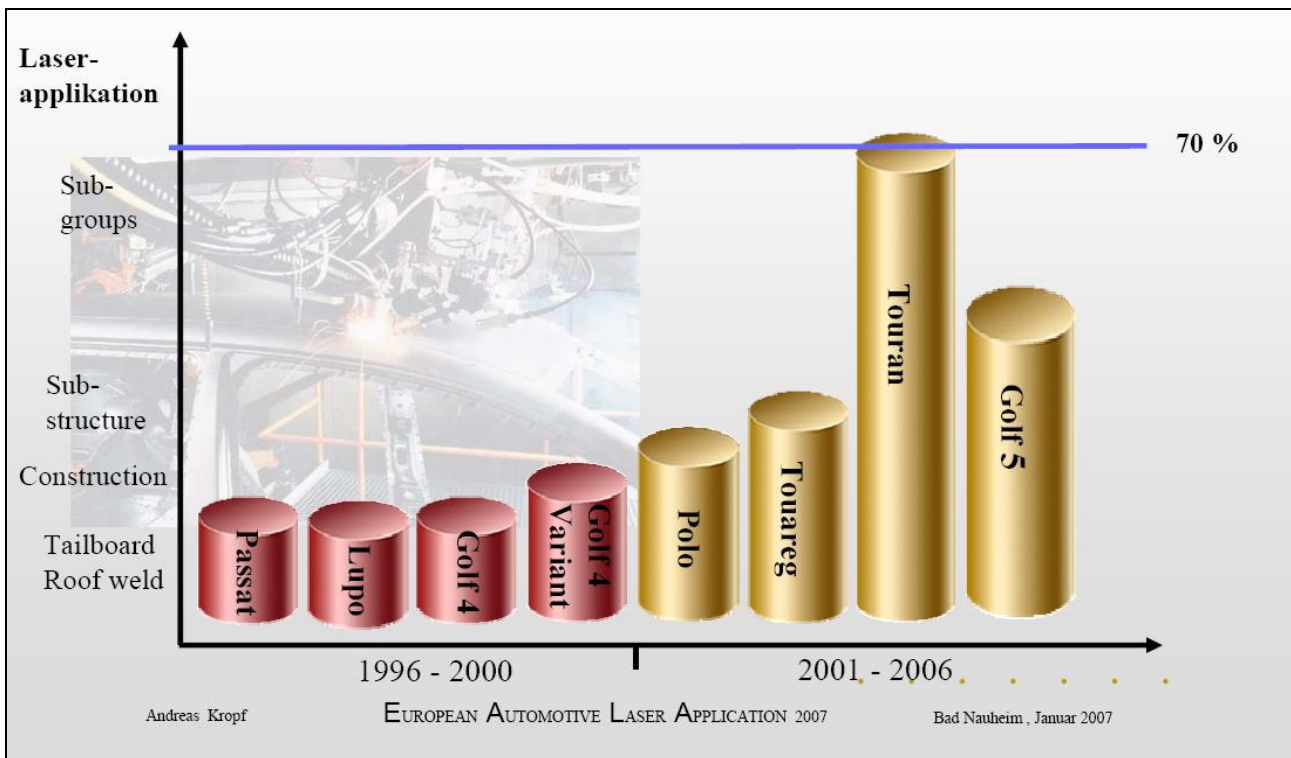


Abbildung 2-4 Prozentualer Lasereinsatz bei Volkswagen Fahrzeugen [25]

2.1.2 Golf, Passat, Phaeton und Bentley Fertigung bei Volkswagen Sachsen

Im Fahrzeugwerk Zwickau werden derzeit ca. 1200 Fahrzeuge der Typen Golf und Passat je Arbeitstag gefertigt. Hinzu kommen ca. 150 lackierte Karossen der verschiedenen Varianten des Phaeton und des Bentley. Insgesamt werden über 30000 m Lasernaht je Tag erzeugt. Die Abbildung 2-5 zeigt eine Übersicht der Fügetechnologien bei der Golf und Passat Karosseriefertigung. In Abbildung 2-6 ist schematisch die Anordnung der Laserstrahl-Fügeverbindungen an der Passat-Karosserie dargestellt.

Zu dieser Fertigung sind im Werk 99 Laserstrahlquellen installiert. Hauptsächlich sind dies lampegepumpte Nd:YAG Stablaser HL 4006 D der Firma TRUMPF Lasertechnik. Die Laser arbeiten im cw Betrieb bei einer Wellenlänge von 1064 nm und der Leistung am Werkstück von 4 kW. Die Strahlführung erfolgt über Lichtwellenleiter (LWL) mit einem Kerndurchmesser von 600 µm. Je Laser können bis zu 6 LWL mit Einzellängen von bis zu 80 m angeschlossen sein. Die aus dem Resonator ausgekoppelte Laserleistung kann wahlweise jeweils auf einen dieser Strahlabgänge aufgeschaltet werden. Die Strahlqualität beträgt 25 mm*mrad. Beim Schweißen werden Bearbeitungsköpfe/Optiken mit 1:1 Abbildung verwendet. D. h., es wird von einem Fokusbereich von 600 µm ausgegangen.

		
4.204 x 1.759 x 1.479	Karosserieabmessung	4.765 x 1.820 x 1.472
8 Sorten (2T, 4T, LL, RL, Volldach, SAD)	Derivate im Karosseriebau	24 Sorten (LL, RL, Volldach, SAD, Front, 4Motion, Dachloch, NAR, RDW, Brasilien)
	Verbindungsumfänge	
3044	Punktschweißen	3515
190	Bolzenschweißen	228
3,53 m	MIG / MAG - Nähte	4,07 m
21,29 m	Laserschweißen	32,81 m
6,10 m	Laserlöten	3,80 m
29,47 m	Kleber	37,11 m
manuell mit Vorrichtung	Montage Anbauteile	manuell mit Vorrichtung
	Clinchen/Blindniete	71

Abbildung 2-5 Fügetechnologien bei der Golf und Passat Karosseriefertigung [26]

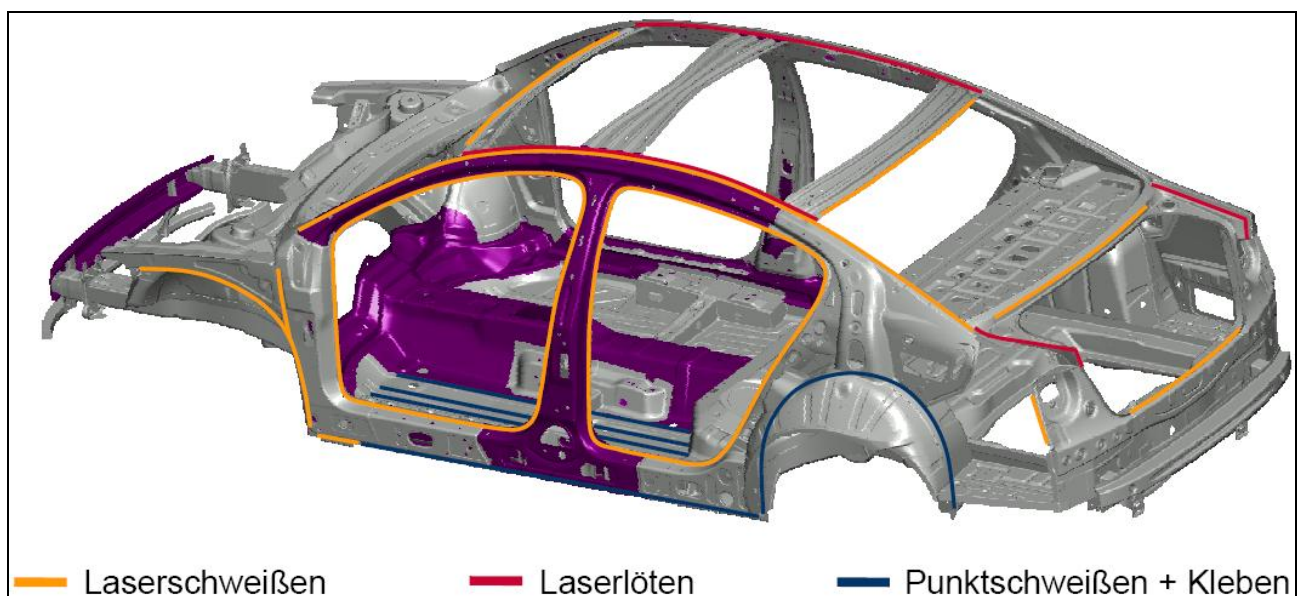


Abbildung 2-6 Fügetechnik am Passat [27]

Je nach Anwendungsfall und in Auswahl der auftragnehmenden Firma für den Fertigungsanlagenbau werden verschiedene Laserbearbeitungswerkzeuge verwendet. Im Fahrzeugwerk der Volkswagen Sachsen GmbH sind installiert (Jan. 2010; Tabelle 2-1, Abbildung 2-7):

Hersteller	Optik	in Abbildung 2-7
Precitec	6 x Schneidoptik 2 x Schneidoptik mit Formcutter	-
TKDN	6 x mit einseitiger Rolle 10 x mit Doppelrolle 4 x Doppelrolle mit Trennrad	a), b) e) f)
Scansonic	32 x Adaptive Laserbearbeitungsoptik	c)
HIGHYAG	28 x gerade, fliegend	d)
	31 x gewinkelt, fliegend	d)
	11 x RSK mit einer Rolle/Finger	a), b)
	9 x RSK mit Doppelrolle/Finger	e)

Tabelle 2-1 Laserwerkzeuge im Fahrzeugwerk Zwickau

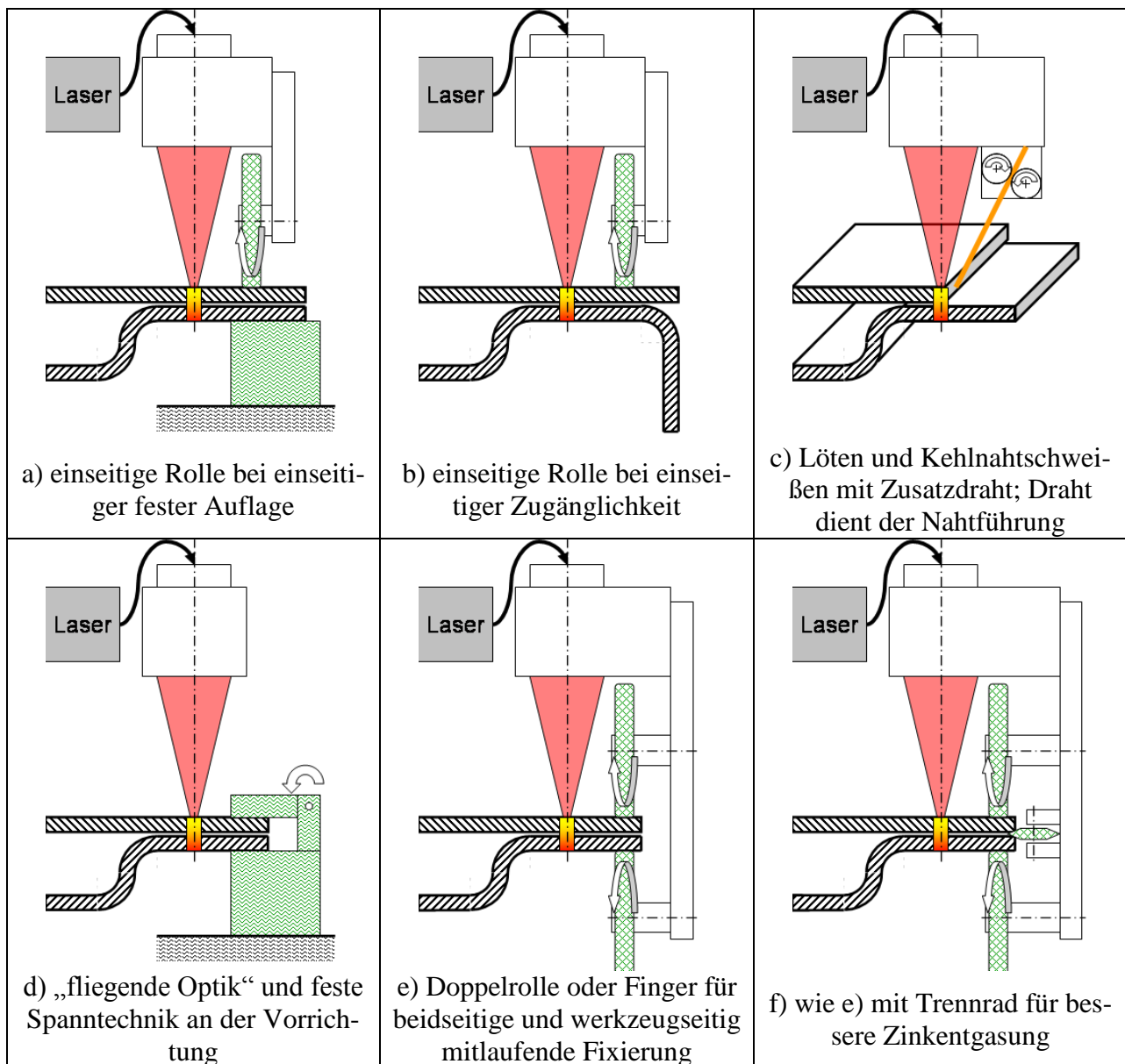


Abbildung 2-7 Ausführungsarten der Laserwerkzeuge

2.1.3 Prozessbesonderheiten beim Laserstrahlschweißen im Karosseriebau

Die typischen Merkmale und Besonderheiten der Laserschweißanwendungen im Großserien-Karosseriebau sind werkstoff- und konstruktionsbedingt. Es werden Stahl-Feinbleche im Dickenbereich von 0,75 mm bis 2,00 mm verarbeitet. Zum Korrosionsschutz vor und während der Verarbeitung sowie im späteren Fahrzeug-Nutzungszeitraum ist ein großer Teil der Bauteile verzinkt. Die Verzinkung der Coils erfolgt zum Ende der Stahlherstellung bereits im Stahl- bzw. Walzwerk. Es werden sowohl Bleche mit Feuerverzinkung als auch mit elektrolytischer Verzinkung eingesetzt. Bei Feuerverzinkung ist die Schichtdicke Z100 (100 g/m²) typisch, elektrolytische Verzinkungen meist in den Dicken 50 oder 75 (5,0 bzw. 7,5 µm Schichtdicke). Den Zusammenhang zwischen Zinkschichtdicke und Auflagengewicht zeigt Abbildung 2-8.

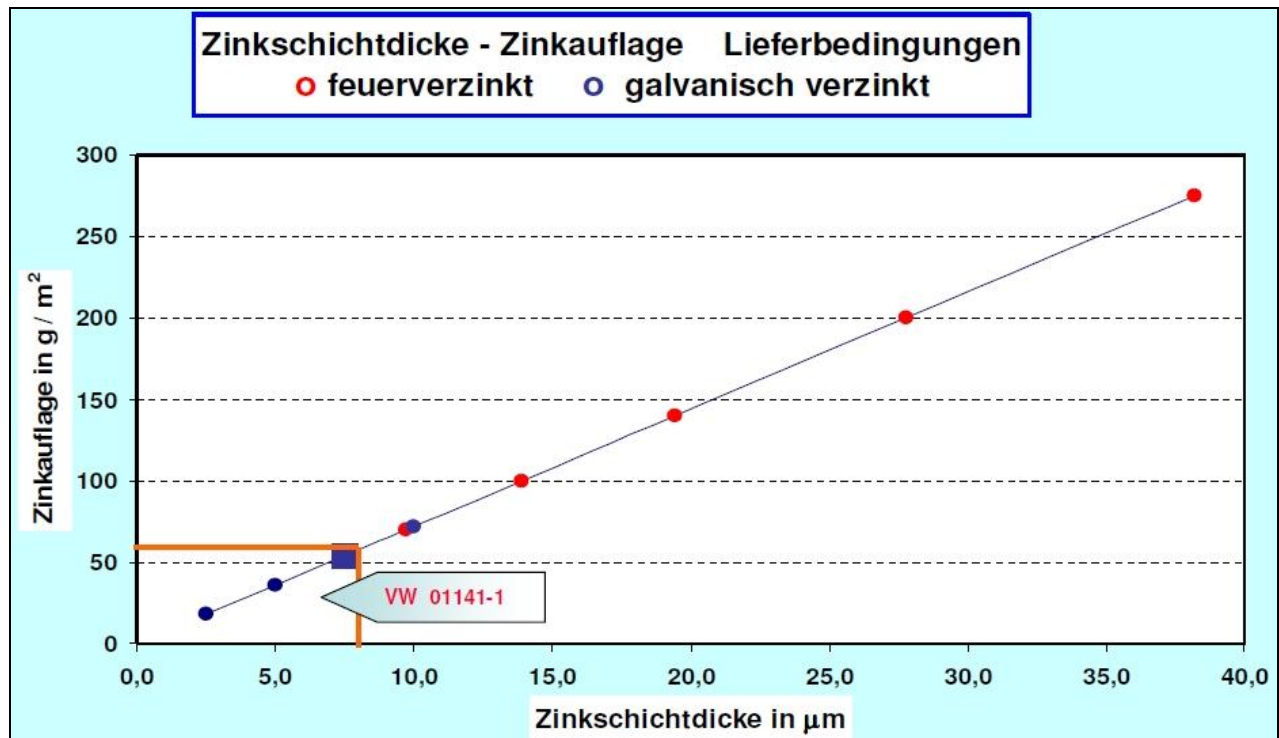


Abbildung 2-8 Zinkschichtdickendiagramm [MAINE III]

Die meisten Karosseriebauteile werden im Tiefziehverfahren in ihre dreidimensionale Endform gebracht. Diese Endform ist in ihrer geometrischen Genauigkeit immer toleranzbehaftet. Absolute Maßabweichungen vom idealen CAD-Modell und Oberflächenwelligkeiten treten auf. Die Größenordnung der Allgemeintoleranz ist vom jeweiligen Bauteil abhängig und in der Zeichnung angegeben. Im Allgemeinen liegt diese an den Referenzpunkten bei $\pm 0,2$ mm und in übrigen Bereichen bei $\pm 0,5$ mm.

Konstruktiv herrscht die selbsttragende Schalenbauweise vor. Dabei werden teilweise mehrere festigkeitsbestimmende innere Strukturen und die designgebende äußere Struktur miteinander gefügt. Die Verbindungsbereiche der Baugruppen sind vorrangig an den Bauteilrändern (Flanschen), welche beim Tiefziehen und Beschneiden im Presswerk vorteilhaft hergestellt werden können.

Traditionell erfolgte das Verschweißen dort durch Widerstandspunktschweißen (WPS). Mit den Schweißzangen werden die nicht ganz ideal zueinander/aneinander liegenden Schweißflansche zusammengedrückt und verschweißt. Diese Flansche wurden/werden auch zum Laserschweißen der Baugruppen genutzt (Abbildung 2-9). Das Zusammendrücken der Bauteile für den La-

erschweißprozess übernehmen entweder zusätzliche vorrichtungsseitige feste Spannelemente oder am Laserschweißkopf angebrachte mitlaufende Einrichtungen.

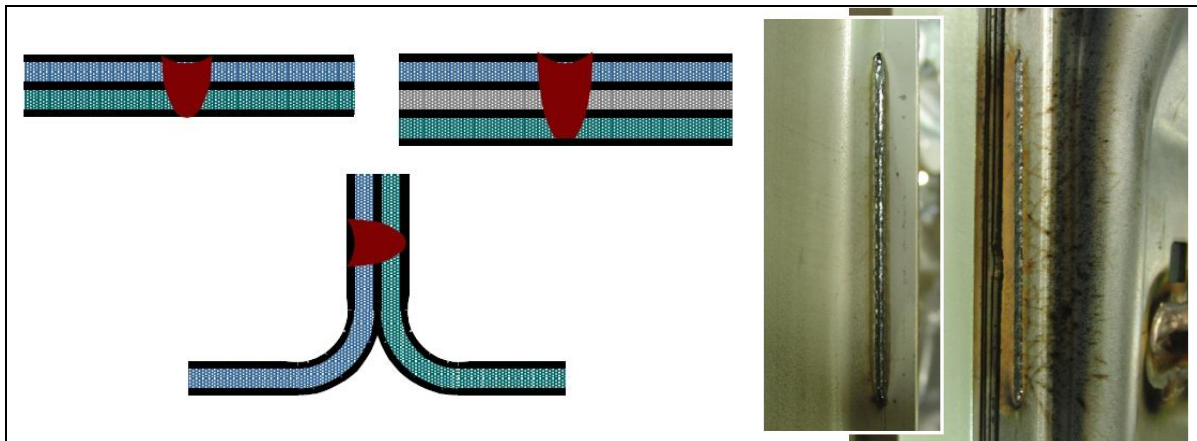


Abbildung 2-9 I-Naht am Überlappstoß an Karosseriebaugruppen (links: Prinzip 2-Blech, 3-Blech, 2-Blech-Flanschverbindung; rechts: 3-Blechflansch, Außen- und Innenansicht)

Die in der Fügeebene zwischen den Stahlwerkstoffen der Bleche vorhandene Zinkbeschichtung stört den Schweißprozess beider Schweißverfahren. Das Zink schmilzt bei 419 °C und verdampft bei 907 °C, während der Stahl-Grundwerkstoff, je nach Kohlenstoffanteil und Legierung, zwischen 1147 °C und 1536 °C flüssig wird. Für einen sicheren Schweißprozess muss der Zinkdampf zwischen dem noch festen oder flüssigen Stahl entweichen können. Beim Laserstrahlschweißen ist je verzinkter Fügeebene zum Entweichen/Entgasen des Zinkdampfes ein Spalt von ca. 0,05 mm bis 0,025 mm erforderlich.

Ist der Spalt zu gering, bewirkt der sich aufbauende Zinkdampfdruck das Ausblasen der Grundwerkstoffschmelze. Verbleibende Poren, Löcher und um den Schweißbereich anhaftende Metallspritzer sind das unerwünschte Resultat. Ist der Spalt zu groß, kann die abgeschmolzene Stahlmenge diesen nicht hinreichend ausfüllen. Nahteneinfall und/oder Wurzelrückfall mit zu geringem Anbindequerschnitt zwischen den Blechen sind die Folge. Die Verbindungsfestigkeit ist zu gering. Bei noch größerem Spalt zwischen den Blechen kann die Schmelze des Bleches an der Strahleintrittsseite komplett abfließen, es entsteht das Fehlerbild „oben geschnitten“ oder die Schmelzen der Fügepartner vereinigen sich nicht, es entsteht keine Schweißverbindung („Falscher Freund“). (siehe Abbildung 2-10)

Die Genauigkeit der tiefgezogenen Blechteile allein reicht nicht aus, um Spaltmaße der richtigen Größe in jedem Fall zu garantieren. Aber auch thermisch bedingte Verformungen durch bereits erfolgte Arbeitsfolgen oder den gerade erfolgenden Prozess wirken nachteilig auf die geometrischen Toleranzen. Es sind immer Maßnahmen zur mechanisch-geometrischen Positionierung der relativen Bauteillage erforderlich.

Vorrichtungsseitige Spanneinrichtungen müssen in geeigneter Entfernung zu jeder einzubringenden Schweißnaht angeordnet sein. Ist die Entfernung zu groß, kann durch die Blechverformungen der optimale Spalttoleranzbereich bereits verlassen sein. Bei zu kleinem Abstand ist die Einspannung möglicherweise zu fest und es gibt keinen Entgasungsspalt. Es kommt zu vermehrten Auswürfen und zur schnellen Verschmutzung der Spanner, was wiederum zu Fehlern führen kann. Im Fall der vorrichtungsseitigen Spanneinrichtungen kommen „fliegende“ Optiken als Laserbearbeitungswerkzeug zum Einsatz.

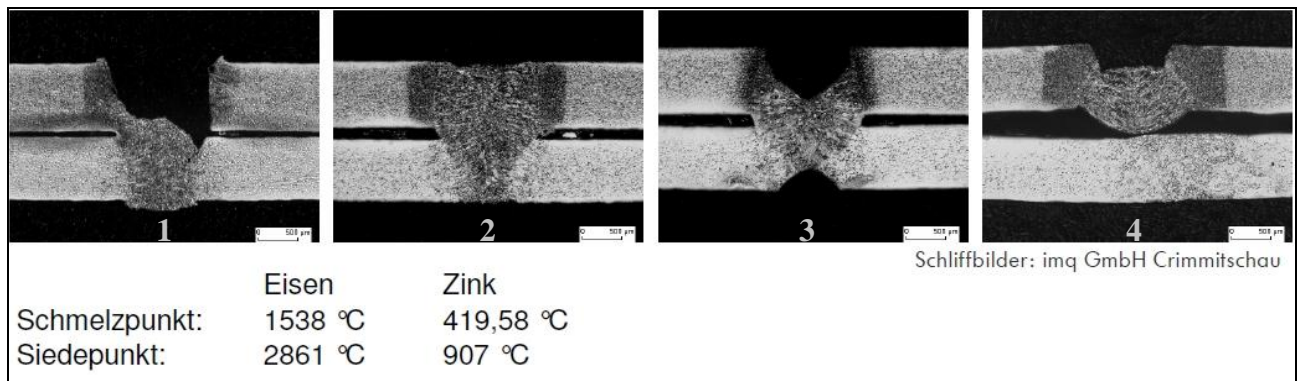


Abbildung 2-10 Makroschliffbilder von Laserschweißnähten

1: Loch oben durch Materialauswurf

2: iO-Naht

3: Nahteinfall und Wurzelrückfall

4: keine Verbindung

Die Laserbearbeitungswerkzeuge selbst können auch mit mitlaufender Spanntechnik ausgestattet sein. Je nach Anwendung sind einseitig andrückende Rollen, Doppelrollen, Doppelrollen mit Spreizrad oder Andrückfinger bekannt. (vgl. Tabelle 2-1) Vorteilhaft ist, dass mit diesen Werkzeugen die Fokusslage an der Wechselwirkungszone konstant gehalten wird.

2.1.4 Entwicklungstendenzen der Laseranwendung im Karosseriebau

Beflügelt durch die Weiterentwicklungen bei Halbleiter- und Festkörperlasern, hin zu höheren Leistungen, besserer Strahlqualität, höherer Zuverlässigkeit, geringerer Baugröße, höherem Wirkungsgrad, geringeren Investitionskosten je Leistungseinheit und geringeren Betriebskosten sind zwei Anwendungstendenzen zu verzeichnen. Diese Tendenzen wurden besonders auf der EALA 2008 in Bad Nauheim deutlich.

2.1.4.1 Halbleiterlaser

Die Halbleiter- bzw. Diodenlaser werden sich bei den Laserlötanwendungen im Karosseriebau durchsetzen. Aktuelle Systeme übertreffen bereits die konventionellen lampengepumpten Stablasers in Leistung und Strahlqualität bei zugleich mehrfach besserem Wirkungsgrad, geringerem Flächenbedarf und Wartungsaufwand. Beispielsweise beim Ford Mondeo dient zum Löten der Verbindung vom Dach zum Seitenteil ein fasergeführter Diodenlaser als Laserstrahlquelle. Gerade der steigende Kostendruck spricht für die zunehmende Einführung der Diodenlaser als Ersatz für die älteren Systeme.

2.1.4.2 Festkörperlaser

Die neuen Festkörperlaser, sowohl als Faser-, als auch als Scheibenlaser, mit Leistungen am Werkstück von $> 4000\text{ W}$ und Strahlqualitäten von $8\text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ermöglichen das Scanner bzw. Remote-Schweißen mit großen Arbeitsabständen (bis ca. 1500 mm) zwischen Bearbeitungsoptik und Werkstück. Bei der Prozessvariante „On the Fly“ wird bei fortfahrender Roboterbewegung und spiegelabgelenkter Strahlführung in der Optik der Laserprozess und die Positionierung zu den Schweißstellen durchgeführt. Die Zeiten zur Weiterbewegung des TCP von Schweißstelle zu Schweißstelle werden somit sehr gering. Die Verweilzeit einer zu fügenden Baugruppe in der Vorrichtung der Arbeitsfolge ist nur wenig größer als die Summe der Einzelschweißzeiten. Die Produktivität solcher Anlagen wird damit sehr hoch. Bei Volkswagen Sachsen wurde eine Pilotanlage zur Fertigung der Rückwand des Passat B6 im Jahr 2005 erfolgreich aufgebaut und die Technologie zur Verwendung im Volkswagen Konzern freigegeben (Abbildung 2-11). Eingesetzt wurde ein 4 kW Scheibenlaser und eine PFO 33 von TRUMPF Laser. Als Führungssystem wurde ein 6-Achs-Roboter verwendet.

Eine weitere Verfahrensvariante ist die „RoboScan“ Technologie der KUKA Systems GmbH.

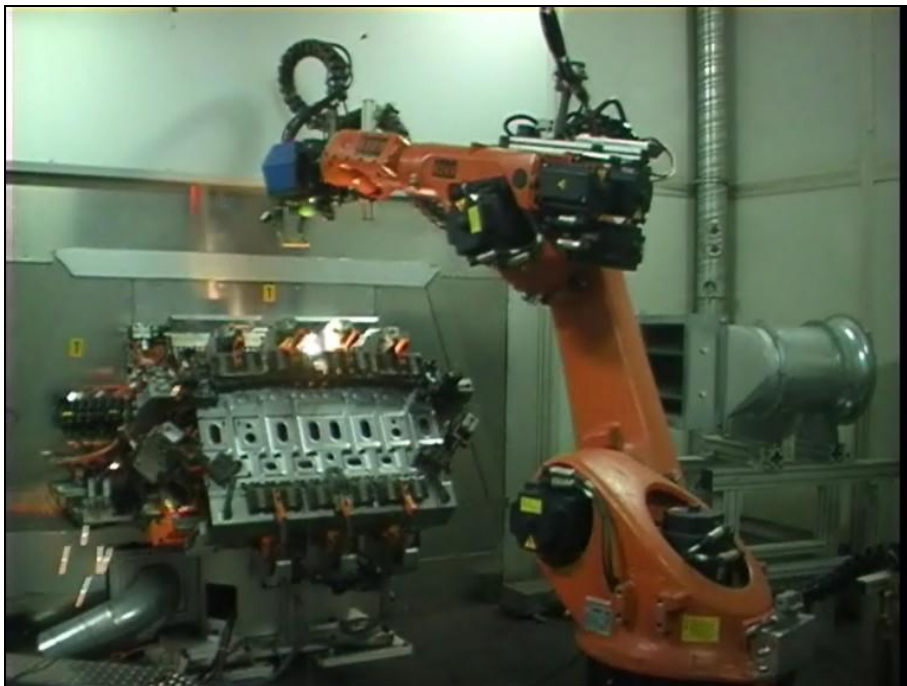


Abbildung 2-11 Scannerschweißen am Passat

Eine Optik ohne x-y-Ablenkspiegel, jedoch mit Zoomfunktion in Strahlrichtung wird im Schweißprozess durch die Handachsen des Roboters geführt. Durch die lange Brennweite der Laser-Optik sind kleinste Winkelbewegungen der Handachsen für den Schweißprozess ausreichend und die Präzision der Bewegungen im Bereich weniger zehntel Millimeter. [28]

Laser Remote Schweißanlagen setzen sich zunehmend bei der Fertigung von Karosserie-Anbauteilen (Türen und Klappen) durch. Die Bearbeitung der kompakten Bauteile ist räumlich gut konzentrierbar und hohe Stückzahlen (4 Türen, 2 Klappen je Fahrzeug) nutzen die Produktivität der Laserstrahlquelle gut aus.

So werden beispielsweise die

- Türen der Daimler C-Klasse
- Türen des Audi A4
- Türen des Renault Twingo 2 und Laguna
- Türen des Fiat Idea und Lancia Musa
- Türen des Fiat Punto, Ducato, Bravo
- Türen des Alpha Romeo 159
- Türen des „New ALPHA Romeo and Lancia C Class“
- Türen und Klappen der Nissan Modelle SILPHY, TIIDA, TIIDA LATIO, MICRA

in Remote-Anlagen geschweißt.

2.2 Qualitätssicherungsmethoden für Laserfügeverbindungen im Karosseriebau

Die Methoden und Verfahrensweisen zur Qualitätssicherung für den Karosseriebau und die gesamten Prozesse bei der Fahrzeugproduktion sind bei Volkswagen Sachsen im Qualitätsmanagement-Handbuch [29] beschrieben und in Arbeitsanweisungen und Verfahrensanweisungen untersetzt.

Die in der Praxis angewendeten Methoden können unterteilt werden in:

<ul style="list-style-type: none"> • Offline Prüfung • Inline Prüfung • Prozessüberwachung 	<ul style="list-style-type: none"> • zerstörend • zerstörungsfrei
---	---

Einen Überblick der Methoden und deren Kategorisierung verschafft Abbildung 2-12.


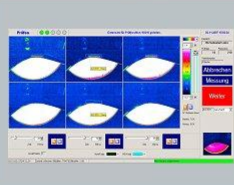

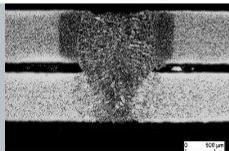




Offline Prüfung		Inline Prüfung		Prozessüberwachung
zerstörend	zerstörungsfrei			
beliebige Nahtarten	I-Naht am Überlappstoß	Laserlöt-Dachnaht	I-Naht am T-Stoß (Schottplatte)	I-Naht am Überlappstoß
Meißelprüfung	Thermographie	Kamerasystem	„WeldWatcher“	fehlernder Baustein!
				
Metallographie				
Zugproben	Sichtprüfung		ohne Fehlerklassifikation	
			mit Fehlerklassifikation	
mit Fehlerklassifikation				

Abbildung 2-12 Laserfügen - Prüfen und Überwachen [26]

2.2.1 Offline Prüfung

Zu den Offline Prüfungen zählen all jene Prüfverfahren, für deren Durchführung die zu prüfenden Baugruppen aus der Fertigungslinie ausgeschleust werden müssen. An festgelegten Positionen in den Fertigungslinien befinden sich Ausschleusstationen. Nach den Festlegungen im jeweiligen Prüfplan werden die Baugruppen meist durch manuellen Steuerungseingriff in die Entnahmeposition bewegt. Dort werden sie, je nach Größe, mit oder ohne Hilfsmittel auf Transportwagen umgesetzt und anschließend zu den Prüfarbeitsplätzen transportiert.

Bereits die Überlegungen zu diesen Arbeitsgängen verdeutlichen den personell-zeitlichen Aufwand und die damit verbundenen Kosten. Weiterhin darf das Ausschleusen, ab einem gewissen Produkt-Fertigungsgrad, die vorgesehene Produktionskette („Perlenkette“) nicht verändern.

(Schon im Karosseriebau werden die Karosserien mit dem TPS-Schild kundenspezifisch getauft.) Um dem zu begegnen, werden spezielle Prüfkarosserien vorgesehen und produziert. Grobe und wiederkehrende Unregelmäßigkeiten führen zu Sperrvermerken, sofortiger Überprüfung der Schweißanlage und der weiteren produzierten Baugruppen, sowie zu Nacharbeitsmaßnahmen.

Als klassisches zerstörungsfreies Offline Prüfverfahren gilt die Prüfung mit Ultraschall. Da deren Einsatz jedoch auf Widerstandsschweißpunkte beschränkt ist, soll es hier unberücksichtigt bleiben.

2.2.1.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung als Beurteilungsmethode durch den prüfenden Fachmann ist allen anderen Offline Prüfungen vorangestellt. Sie ist für alle visuell zugänglichen Nähte zerstörungsfrei. Unter zu Hilfenahme einfacher Messmittel und ggf. einer Lupe ergibt die Sichtprüfung den „äußeren Befund“ (vgl. [117]) der Prüfung. Es sind folgende Merkmale ermittelbar:

- Vorhandensein einer Schweißnaht
- Länge, Breite
- Position, Lage
- Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall
- Durchgangslöcher, Oberflächenporen, Endkrater
- Unterbrechungen
- angeschmolzene Schweißspritzer
- Kantenanschmelzung
- Risse
- Nahtüberhöhung, Wurzeldurchhang
- Oberblech „geschnitten“

Die Auflistung zeigt die Erkennungsvielfalt und Wichtigkeit dieser einfachen Prüfung, verdeutlicht jedoch auch den damit einhergehenden Zeit- und Kostenaufwand.

2.2.1.2 Meißelprüfung, Abrollprüfung

Die Qualitätskontrolle unter dem Fokus der Festigkeitseigenschaften erfolgt als zerstörende Meißelprüfung. Die Karosserieteile werden an den Fügestellen durch manuelles Aufmeißeln geprüft. Die Beanspruchung erfolgt mittig, parallel zur Naht in Schweißrichtung bis zum Bruch. „Alternativ zur Meißelprüfung kann eine Abrollprüfung durchgeführt werden. Bei der Abrollprüfung wird mit Hilfe eines Abrolldornes die Schweißverbindung durch Abrollen der Bleche zerstört. Dabei kann sowohl die Schweißung als auch das Bauteil reißen.“ [117]

Es kann eingeschätzt werden:

- Verbindungslänge
- Verbindungsbreite
- Die Bruchart (Ausknöpfbruch, Bruch in der Fügeebene, Mischbruch)
- Subjektiv, die Verbindungsfestigkeit

Angemerkt werden muss, dass diese Prüfungen bei verschweißten hoch- und höchstfesten Werkstoffen oft nicht mehr anwendbar ist. Alleine der Kraftaufwand, um mit dem Prüfmeißel zwischen die Bleche an den Nahtbereich zu gelangen, ist enorm hoch und manuell kaum aufzubringen. Das gilt auch beim Einsatz von Druckluftmeißeln.

2.2.1.3 Scherzug-, Kopfzugprüfung

„Die Prüfung wird empfohlen bei Neuanlauf einer Schweißanlage. Sie kann alternativ zur Meißelprüfung und Abrollprüfung eingesetzt werden. Sie liefert eine Aussage über das Bruchverhalten. Eine einzelne Naht (Probleblech) wird in Nahrichtung in einer Zugprüfmaschine bis zum Versagen der Naht oder des Bauteilabschnittes geprüft. Das Bruchbild wird beurteilt wie bei der Meißelprüfung. Die Abzugsgeschwindigkeit darf 10 mm/min nicht überschreiten.“ [117]

2.2.1.4 Nutzung der Metallografie

Die metallografischen Untersuchungsmethoden zur Gefügeanalyse und Ermittlung innerer Nahtmerkmale sind wichtige Werkzeuge in den Prüflaboren der Karosseriefertigung. „Die metallografische Prüfung ist eine zerstörende Prüfung. Nach Herstellung eines Schliffbildes wird die Nahtgeometrie ermittelt. Die Beurteilung erfolgt bei einer Vergrößerung von (10 bis 20) : 1 am ungeätzten Schliff (für Risse) und am geätzten Schliff (für das Gefüge).“ [117]

Es können Nahtquerschliffe (Abbildung 2-13) und Längsschliffe angefertigt werden.

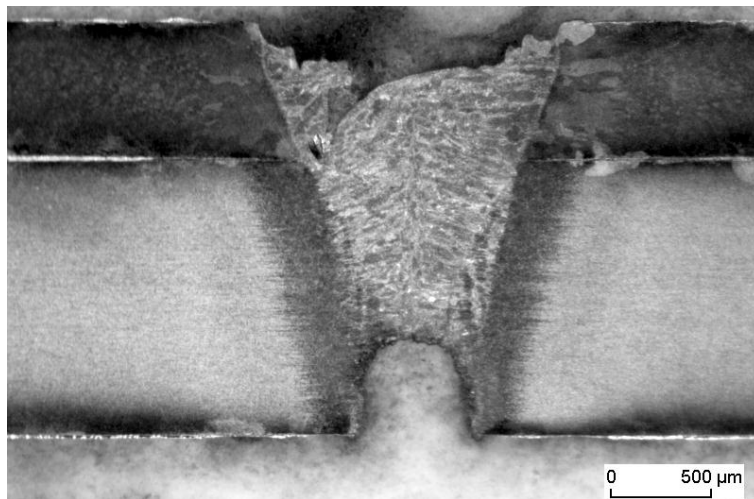


Abbildung 2-13 Metallografisches Querschliffbild zur Beurteilung des inneren Befundes und der Anbindemaße (Bewertung nach [117] niO; Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall > 0,25 t) [imq GmbH Crimmitschau]

Die bei diesem inneren Befund ermittelbaren Merkmale sind:

- Anbindemaße
- Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall (quantitativ)
- Risse
- Nahtbreiten in den Fügeebenen
- Nahtdicke (bei Kehlnähten)
- Poren in der Naht, in den Fügeebenen, die Porenflächen
- Bindefehler
- Einbrandtiefe
- Fremdstoffe und Einschlüsse
- Gefügebestandteile
- Mikrohärtewerte

Im Normalfall werden Makroschliffe angefertigt und hinsichtlich der Anbindemaße und eventueller Poren bewertet. Mikroschliffe zur Gefügebeurteilung und Härtemessung sind hingegen nur bei technologischen Änderungen oder in Ausnahmefällen üblich.

2.2.1.5 Offline Thermografie

Seit einigen Jahren setzen sich Prüfanlagen für Laserschweißnähte mittels Thermografie durch. Offline bedeutet in diesem Fall: außerhalb der Fertigungslinie; die Prüfteile werden aus dem Fertigungsfluss entnommen, der Prüfung zugeführt und unterzogen, anschließend wieder in die Fertigungslinie eingeschleust. Damit wird die zerstörende Prüfung zu großen Teilen ersetzt. Es wird die Verfahrensvariante der Impuls-Wärmeﬂuss-thermografie im „Durchlichtverfahren“ angewendet. D. h. die zu prüfende Bauteilverbindung wird zwischen einer Blitzlicht-Anregungsquelle und der Thermokamera positioniert. Der Blitz wird zumeist auf die Laserstrahlaustrittsseite der Schweißverbindung gerichtet. An der Gegenseite wird mit einer Kamera der durch das Bauteil strömende und austretende Wärmeﬂuss aufgenommen. Dessen örtliche Verteilung und Geschwindigkeit gibt Aufschluss über Verbindungsfehler und Störstellen in der Schweißstelle. (Abbildung 2-14) Die Anwendung ist besonders gut zur Prüfung von I-Nähten am Überlappstoß geeignet (Abbildung 2-16, Abbildung 2-17). Nachteilig ist die erforderliche beidseitige Zugänglichkeit an den zu prüfenden Positionen.

Die Bewertung der aktuellen thermographischen Aufnahmen erfolgt durch den Prüfer, indem er diese mit den Aufnahmen von iO-Schweißungen vergleicht. Automatisierte Auswertelgorithmen sind in der Entwicklung und Erprobung und werden in absehbarer Zeit die Prüfer bei ihrer Entscheidung verstärkt unterstützen.

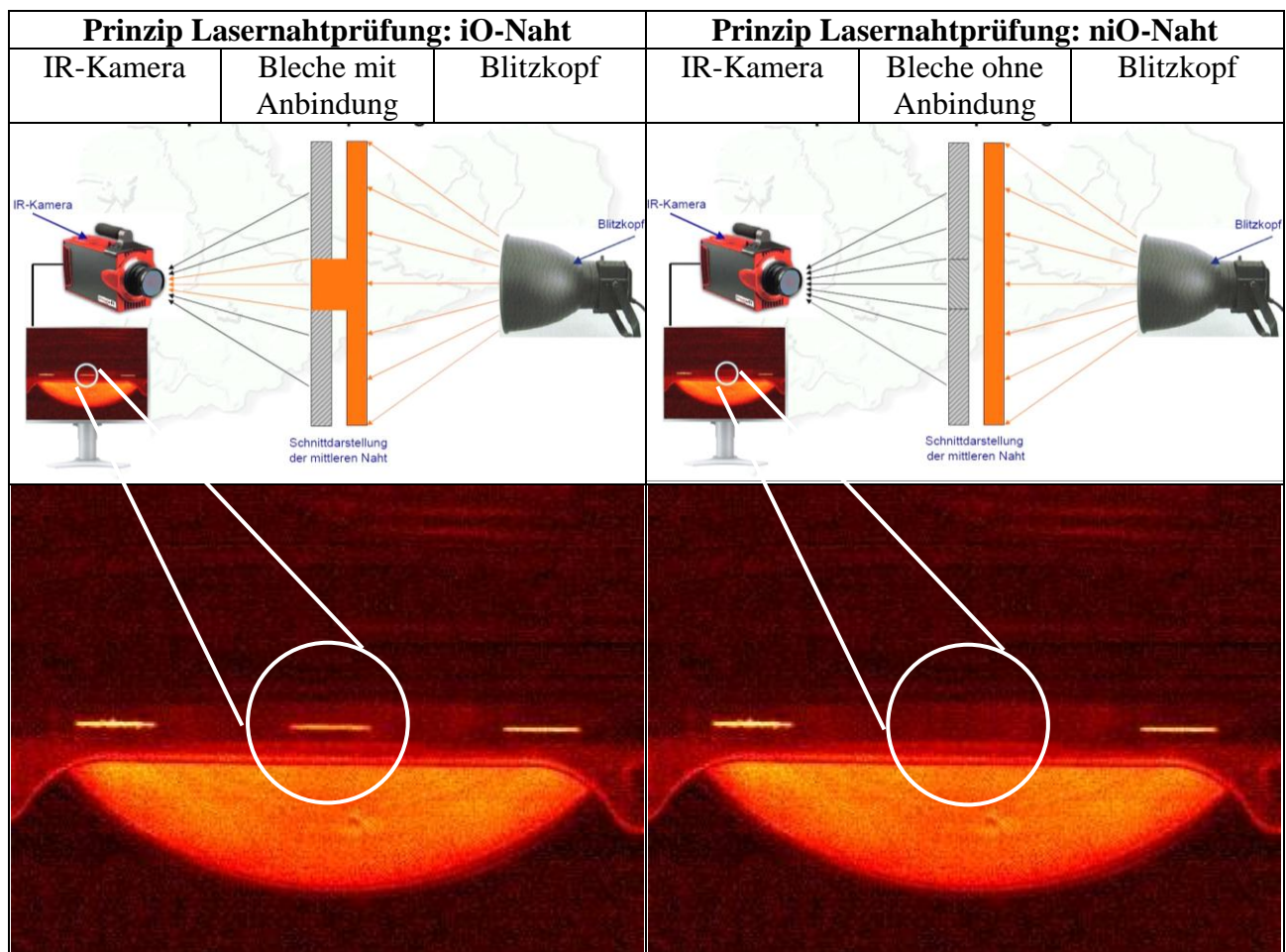
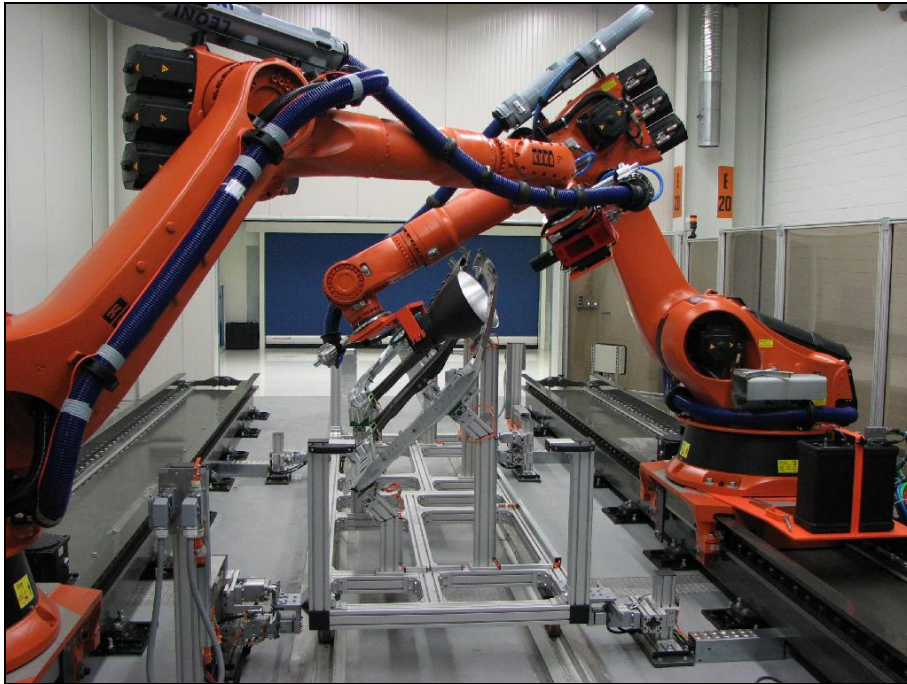


Abbildung 2-14 Thermografie - Aufbau und Wirkungsweise [30]

Mit der Thermografie werden vorzugsweise innere Bindefehler und Fehlstellen detektiert. Die organisatorische Kombination mit der Sichtprüfung ist deshalb zweckmäßig. Diese Merkmale sind mit der Thermografie ermittelbar:

- Vorhandensein einer Schweißnaht
- Bindefehler („Falsche Freunde“)
- Länge
- Position, Lage
- Durchgangslöcher
- Innere Poren (Größe \geq Tiefe)
- Unterbrechungen

Thermografische Prüfanlagen sind nicht nur wegen der relativ teuren Thermokameras aufwändig. Die gesamte Anlagentechnik (Abbildung 2-15) mit Robotern, Steuerungen, Umhausung (bei Blitzanlagen) und der große Flächenbedarf bewirken hohe Investitionskosten.



**Abbildung 2-15 Thermografieranlage bei Volkswagen Sachsen
Passat Seitenteil links**

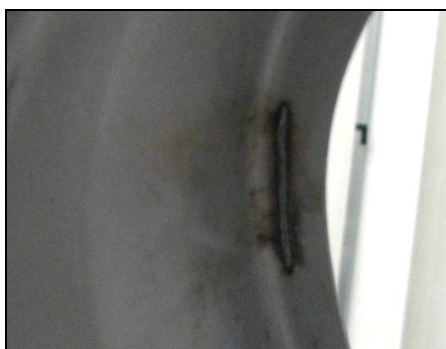


Abbildung 2-16 Naht JA3-3031 von innen



Abbildung 2-17 Naht JA3-3031 von außen

2.2.1.6 Farbeindringprüfung, Röntgen, Computertomografie

Die Farbeindringprüfung wird in [117] benannt und ist geeignet Risse an der Oberfläche ersichtlich zu machen. Die Anwendung erfolgt nur im Ausnahmefall.

Die Röntgenaufnahmen mit schräger Durchstrahlung macht innere Merkmale ähnlich der Thermografie sichtbar. Die Prüfung erfolgt durch externe Labore nur im Ausnahmefall oder als Referenzverfahren bei der Qualifizierung andere Prüfmethoden.

Eine Computertomografie-Prüfanlage betreibt Audi im Aluminium Karosseriebau in Neckarsulm. Die dreidimensionalen Abbildungen zum äußeren und inneren Befund sind sehr detailreich und qualitativ hochwertig. Die Prüfung von Baugruppen aus Aluminiumlegierungen funktioniert sehr gut. Stahlwerkstoffe sind hingegen weniger geeignet. Die Datenaufnahme für beispielsweise eine Tür dauert mehrere Stunden. Die Bewertung der Ergebnisse am Computerbildschirm erfolgt durch das Fachpersonal.

2.2.2 Inline Prüfung

Der gebräuchliche Begriff „Inline“ meint in den Fertigungslinien befindlich. Die Prüfverfahren sind im Fertigungsfluss der Baugruppen eingereiht. Die Baugruppen müssen für die Prüfung nicht der Linie entnommen werden, logistischer Aufwand fällt nicht an und die Reihenfolge der Fertigung wird nicht gestört.

2.2.2.1 Sichtprüfung

Auch in der Fertigungslinie ist die manuelle Sichtprüfung von hoher Wichtigkeit. Diese erfolgt für die Laserschweißnähte zumeist in nachfolgenden Arbeitstationen oder im Finishbereich der jeweiligen Fertigungslinie. Dabei kann naturgemäß nur die Kontrolle auf Vorhandensein und gröbere äußere Unregelmäßigkeiten erfolgen.

2.2.2.2 Automatisierte Inline - Qualitätskontrolle der Dach-Laserlötnaht

Bei Volkswagen Sachsen wurde ein System zur Qualitätskontrolle der Dach-Laserlötnahte der Golf und Passat Produktion durch ein robotergeführtes Kamerasystem eingeführt. Die Technik ersetzt die manuelle Sichtkontrolle bezüglich Oberflächenporen, fehlendem Lot, anhaftenden Spritzern, Nahtsprüngen, abstehendem Draht und misst die Breite der Naht. Beleuchtet wird mit gepulsten weißen Leuchtdiodenfeldern. Die Fehlerbilder werden fahrzeugbezogen gespeichert, die Karosserien werden automatisiert, entsprechend dem Fehlerbild zielgesteuert. An Nacharbeitungsstationen erfolgt eine fahrzeugbezogene Visualisierung der Fehlerbilder. Die Abbildung 2-18 und Abbildung 2-19 zeigen die eingesetzte Hard- und Software des Systems.



Abbildung 2-18 Hardware Dachlaserlötnahtprüfung

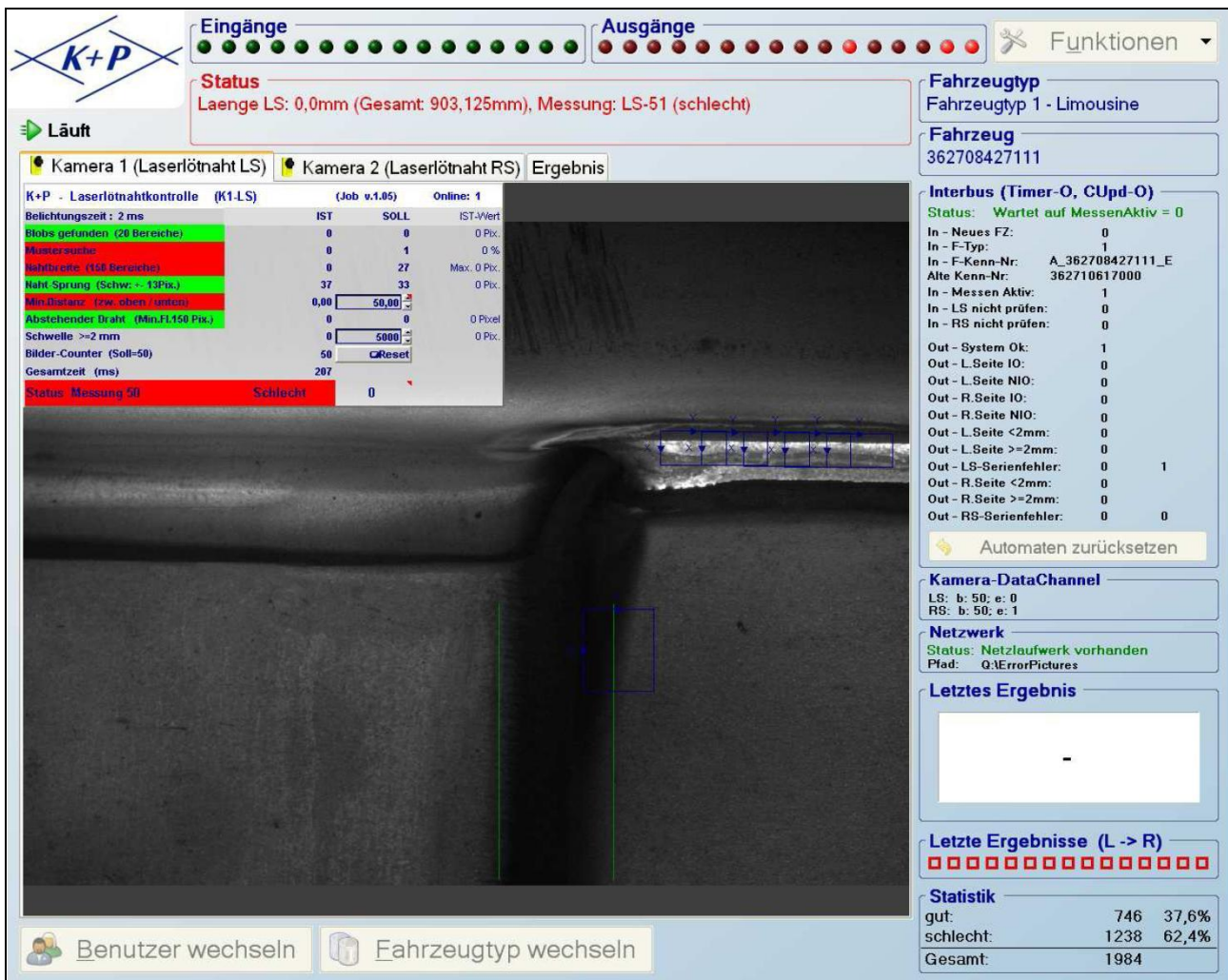


Abbildung 2-19 Software Dachlaserlötnahtprüfung [Krempien+Petersen Qualitäts-Kontrollsysteme GmbH]

2.2.2.3 Inline Thermografie

Mit der Einführung der Offline Thermografie in der Fertigungspraxis begannen Überlegungen, dieses Prüfverfahren in die Fertigungslinien zu integrieren, die Prüfung und Auswertung zu automatisieren und die Prüfquote zu erhöhen. Verstärkt vorangetrieben wurde diese Thermografieentwicklung durch die Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH Berlin (INPRO). Gemeinsam mit der Auto5000 GmbH Wolfsburg wurde eine Testanlage für die Inline Prüfung von Laserschweißnähten an der B-Säule des Touran aufgebaut und getestet. Die energetische Anregung erfolgt dabei mit Kaltluft, die Auswertesoftware und iO/niO Bewertung ist automatisiert. Es wurden sowohl Detektor-, als auch preiswerte, ungekühlte Bolometer-Infrarotkameras verwendet.

Die Machbarkeit und die Erkennungssicherheit ist inzwischen nachgewiesen. Neben zahllosen technischen Details ist die Auswertesoftware das wichtigste Entwicklungsergebnis. Dennoch kann die Inline Thermografieprüfung nicht mit den Taktzeiten der Großserienfertigung mithalten. Für 100% Prüfungen müssten nach jeder Schweißstation mehrere Prüfroboter arbeiten. Vorher ist jedoch eine thermische Homogenisierung um die Schweißstellen angeraten.

2.2.2.4 Oberflächenscanner und Wirbelstromprüfung

Beide Verfahren zur Oberflächenprüfung und zur Prüfung oberflächennaher innerer Merkmale sind Stand der Technik und in der Karosserie-Zulieferindustrie im Einsatz. Oberflächenscanner

(im Lichtschnitt-Triangulationsverfahren) liefern Messwerte in Längeneinheiten, werden für die Nahtführung und Aufzeichnung der entstandenen Topografie verwendet. Die physikalischen Grenzen liegen in der Feinheit der projizierten Lichtlinien, der Auflösung des Detektors und den Reflexionseigenschaften der Oberflächen. Die Hardware muss hinreichende Messraten erlauben und die Software den geforderten Ansprüchen genügen. Die Laserschweißnähte von Tailor Welded Blanks werden u.a. mit diesen Sensoren geprüft [31][32]. Ein System für den Prüfeinsatz an fertig gefügten Rohbaukarossen wurde in [33] vorgestellt und ist für die Qualitätskontrolle von Laserlötnähten in der Serienanwendung.

Die Wirbelstromprüfung ist auf Grund der Eindringtiefe zur Bewertung oberflächennaher innerer Merkmale geeignet. Risse an der Oberfläche, Löcher, Poren, Nahteinfall, unterbrochene Nähte, anhaftende Spritzer u. ä. können detektiert werden. Gut geeignet ist die Nahtart „I-Naht am Stumpfstoß“ bei gleicher Dicke beider Bleche. Der Einsatz zur kontinuierlichen Schweißnahtprüfung in Längsprofilieranlagen bietet sich geradezu an [34].

Die Weiterentwicklung bzw. Qualifizierung beider Verfahren für die Prüfung von 3-D-Laserschweißnähten im Karosseriebau erfolgte zeitgleich zu dieser Arbeit durch die Firmen imq - Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik GmbH Crimmitschau, ibs Automation GmbH Chemnitz und das Fraunhofer IWU in Chemnitz. Die Einbindung in die Laserzelle erfolgte durch Volkswagen Sachsen und Meyer Ingenieurbetrieb Zwickau.

Zielstellung war, mit der Wirbelstromprüfung Oberflächenmerkmale, oberflächennahe innere Merkmale und tiefer liegende innere Merkmale bis hin zur Anbindung in der Fügeebene zu detektieren [35]. Der Lichtschnittsensor liefert einerseits Informationen der Nahtoberflächentopografie und dient andererseits als Messmittel zur Toleranz ausgleichenden Lageregelung der Wirbelstromsonde.

Die eigentliche Wirbelstromsonde ist in einer gehärteten Hülse einige zehntel Millimeter zurückgesetzt, um einen konstanten Luftspalt einzuhalten. Die gehärtete Hülse wird federnd gelagert taktil am Bauteil geführt. Die erkennbaren Nahteigenschaften sind in Anlage 10.2 (Seite 137) zusammengefasst.

Die Erprobung (Abbildung 2-20) erfolgte gemeinsam bei Volkswagen Sachsen. Aus diesen Erfahrungen sind die technologischen Anforderungen bekannt und wurden bei der Entwicklung berücksichtigt.

- Steigerung der Aussagesicherheit
- Nahtabschnittsprüfung
- Minimierung des Anlernaufwandes
- Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit
- Verbesserung der Positioniergenauigkeit, bzw. Positioniertoleranzunempfindlichkeit
- Vermeidung von Referenzierstopps
- Richtungsunabhängigkeit
- Erhöhung der Eindringtiefe
- Kombination mit Nahtfindungssystem (Oberflächenscanner)

Der Oberflächenscanner kann die Nahttopographie und angrenzende Bereiche in Längeneinheiten liefern und ist deshalb gemäß Anlage 10.2 (Seite 137) als Messverfahren eingruppiert. Die 3D-Berechnung aus den gelieferten Rohdaten und Kontrastwerten erfordert jedoch einen nicht zu unterschätzenden Aufwand. Mit dem erprobten Sensor+Rechnersystem wurden die Rohdaten als Datei je gescannte Naht ausgegeben und durch die Vorkonditionierung der Auswertesoftware für die Nahteigenschaftsbewertung vorverarbeitet.

Entwicklungspotential besteht dennoch auf den Gebieten:

- Entfall der notwendigen SPS

- Entfall des notwendigen Extra-PC
- direkte Netzwerkfähigkeit des Sensors
- Übergabefähigkeit von Baugruppen- und Nahtidentifikationen zur konkret benannten Datenspeicherung
- Augensicherheit des Sensors
- Ausgabefähigkeit des zeilenweise erzeugten Bildes
- Verringerung der Sensorbaugröße zur Minimierung von Störkanten



Abbildung 2-20 Wirbelstromprüftest an Schwellernähten

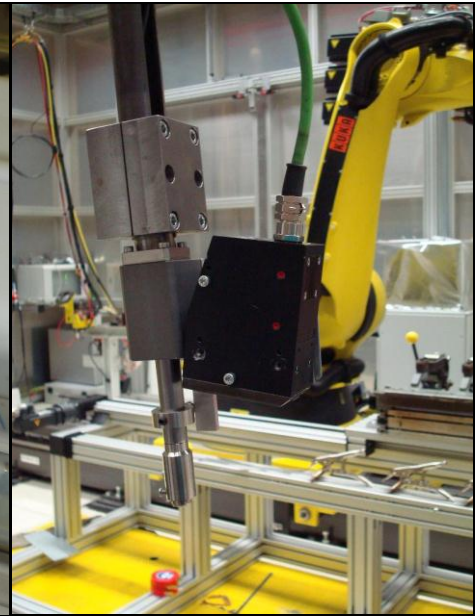


Abbildung 2-21 Oberflächen-scanner in Kombination mit der Wirbelstromsonde

Die Kombination beider Sensoren wurde bei Volkswagen Sachsen realisiert und erprobt (Abbildung 2-21). Die Prüfgeschwindigkeit kann mit der Laserschweißgeschwindigkeit mithalten. Dadurch wäre eine bis zu 100% Inline Prüfung aller zugänglichen Nähte möglich. Nachteilig ist insbesondere die nach wie vor geringe Eindringtiefe des Wirbelstroms. Tiefer liegende Merkmale können nur durch sekundäre Effekte wie Gefügeveränderungen durch die Schweißung nachgewiesen werden. Dies beeinträchtigt die Erkennungssicherheit. Weiterhin ist der Interpretationsaufwand der Wirbelstromsignale nicht anwenderfreundlich.

Besonders nachteilig ist jedoch der hohe Flächenbedarf einer solchen Prüfstrategie. Nach jeder Laserschweißstation müsste eine komplette Prüfstation samt Roboter in den Fertigungslinien vorgesehen werden. Dieser Platz ist in bestehenden Fertigungswerken nicht gegeben.

Wird direkt am Laserbearbeitungswerkzeug ein Liniengenerator für den Nachlauf des Prozesses angeordnet, kann zusammen mit einer Kamera (2.2.3.2) eine Oberflächenanalyse dargestellt werden. Erste Lösungen dafür sind am Markt verfügbar. Der zusätzliche Anlagenplatzbedarf besteht damit nicht. Hinderlich können noch die Verschmutzungsgefahr des Liniengenerators, die zusätzlichen Störkonturen und die Richtungsabhängigkeit in der Benutzung sein.

2.2.3 Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

Das Laserschweißen findet ausschließlich in automatisierten und geschlossenen Anlagen statt. Diese Anlagen bedingen zwangsweise zahlreiche Überwachungsfunktionen wie Teile-(vorhandensein)-Kontrollen, Stellungen der Positionier-, Bestimm- und Spannelemente, Schaltfunktionen mit Rückmeldungen, Laserleistungsüberwachung, Temperaturkontrollen, Optik- und Schutzglaszustand usw.. Absauganlagen, regelmäßige Reinigung und vorbeugende Instandhaltung gewährleisten die Funktionalitäten der Anlagen schon aus Gründen der sicheren Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit.

Unter Prozessüberwachung sind hier nicht die Überwachung der system- und anlagentechnischen Parameter gemeint, sondern es ist die Überwachung der unmittelbar aus der Wechselwirkungszone Laserstrahl – Werkstoff entweichenden Emissionen zu verstehen. Abbildung 2-22 zeigt die Modelldarstellung des Lasertiefschweißprozesses [36], ergänzt um die wesentlichsten und am häufigsten verwendeten oder untersuchten Prozessemissionen.

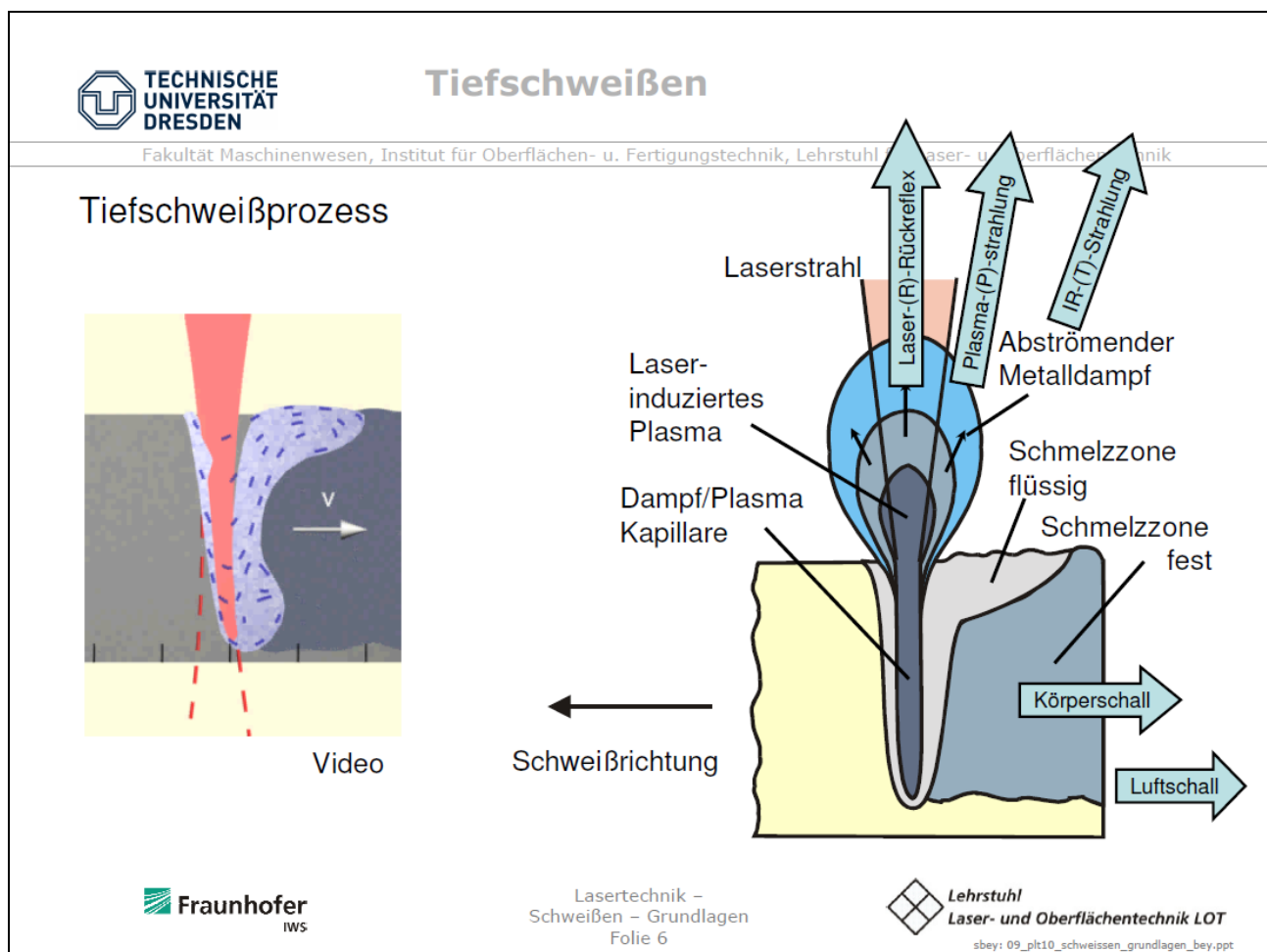


Abbildung 2-22 Modelldarstellung des Tiefschweißprozesses nach [36] ergänzt um die gewöhnlich bei der Prozessüberwachung erfassten Emissionsarten; Laser-(R)-Rückreflex, Plasma-(P)-Strahlung, IR-(T)-Strahlung, Körperschall, Luftschall

2.2.3.1 Photodetektoren

Die meisten Prozessüberwachungssysteme erfassen und verarbeiten elektromagnetische Emissionen aus der Laser-Werkstoff-Wechselwirkungszone. Die nicht bildgebenden Verfahren verwenden Photoempfänger zur integralen Aufzeichnung des Prozessleuchtens, der reflektierten Laserstrahlung oder langwelligerer Abstrahlungen aus der flüssigen, der erstarrenden und erstarrten Schmelze sowie umgebender Bereiche. Die Abbildung 2-23 charakterisiert das nutzbare Prozessleuchten. Nachdem in den Anfangsjahren die Photoempfänger als externe Einheit an den Bearbeitungsoptiken angebracht wurden, haben sich inzwischen interne Sensoren bzw. koaxiale Anordnungen durchgesetzt. Vorteile sind der entfallende Justieraufwand und geringere Störkonfiguren. Eine Übersicht verschiedener prozessüberwachender oder kontrollierender Systeme zeigt Tabelle 2-2.

2.2.3.2 Kamerasysteme

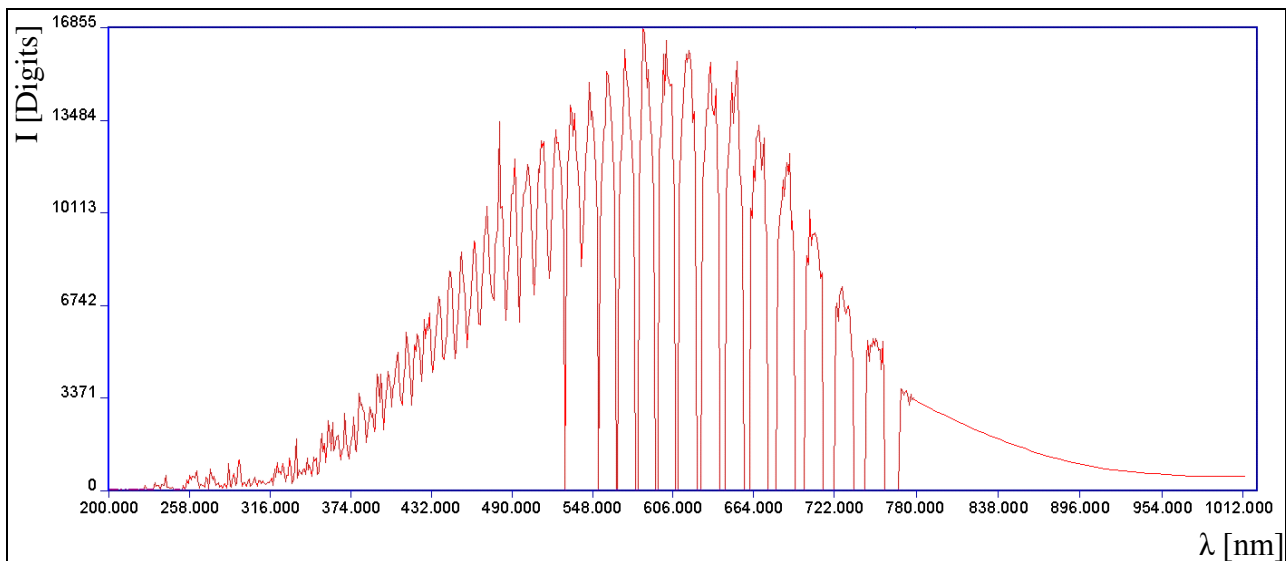


Abbildung 2-23 Strahlungsintensität über der Wellenlänge des Laserschweißprozesses [FhG IWS, 2004]

Vermeehrt werden CMOS Kameras als bildgebende Sensoren verwendet. Anfangs erlaubten die optischen Schnittstellen zum Anschluss von Kameras an den Bearbeitungsköpfen lediglich den Blick entlang der optischen Achse zum genaueren Programmieren der Schweißpositionen mit dem Roboter. Bei eingeschaltetem Schweißlaser wurden die CCD Kameras übersteuert und lieferten keine verwertbaren Bilder. Erst Kameras mit kürzesten Belichtungszeiten ($\sim 0,01$ ms), hohem Dynamikbereich für die auftretenden hell-dunkel Kontraste, programmierbaren Kennlinien und ROI (Region of Interest) ermöglichen die direkte Aufzeichnung aus der Wechselwirkungszone. Durch geeignete optische Filter ist der bildtrübende Einfluss des ausströmenden Metaldampfes minimierbar. Dennoch ist ohne zusätzliche Beleuchtung nur die Form und Größe des Keyhole abschätzbar. Darstellungen in Falschfarben ermöglichen weiteren Interpretationsspielraum. Durch zusätzliche Prozessbeleuchtungen mit Laserdioden geeigneter Wellenlängen sind nun auch die umliegende Oberfläche, die flüssige und erstarrende Schmelze sowie Verflüssigungs- und Verdampfungslinien der Beschichtung erkennbar (Abbildung 2-24).

In [114] und [45] sind die Potentiale fremd beleuchteter kamerabasierter Prozessbeobachtungen aufgezeigt und nachgewiesen. Demnach sind mit dieser Technikonfiguration für die Überlappnähte im und unmittelbar nach dem Prozess folgende Informationen gewinnbar:

- Obere Geometrie der Dampfkapillare
- Untere Öffnung der Dampfkapillare

- Geometrie der flüssigen Schmelze
- Geometrie der erstarrten Schmelze
- Fokusslage (Arbeitsabstand)
- Schweißgeschwindigkeit

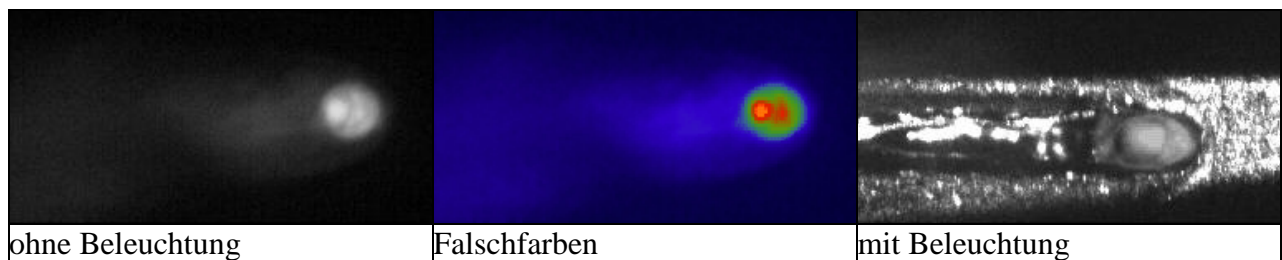


Abbildung 2-24 Laserschweißprozessbeobachtung ohne Beleuchtung, ohne Beleuchtung in Falschfarben-Darstellung, mit Zusatzbeleuchtung

Ein Inprozess Prüfsystem für das Laserschweißen von Aluminium Türen der derzeitigen 5er und 7er Reihen von BMW wurde in [50] vorgestellt. Das Laserbearbeitungswerkzeug (Scansonic ALO3) ist mit einem 6 bis 10 W Laserbeleuchtungsmodul und einer Prozesskamera ausgestattet. Mit dem einblendbaren Fadenkreuz ist die Draht-Fokuspositionierung komfortabel justierbar. Im Schweißprozess werden beleuchtete Aufnahmen aufgezeichnet und können bei nachträglich auffallenden Unregelmäßigkeiten aufgerufen werden. Im Beispiel werden 260 Bilder je Sekunde bei einem ROI von $460 \times 200 \text{ Pixeln}^2$ aufgezeichnet. Der Bereich der Dampfkapillare und ein Abschnitt der erstarrten Schmelze werden durch die Bildverarbeitungssoftware analysiert.

2.2.3.3 Schallanalysen

Den vom Schweißprozess ausgehenden Schall zu analysieren, zu hören und damit den Prozess zu beurteilen ist wahrscheinlich so alt wie das Schweißen selbst. Deshalb gab es in der Automatisierungs- und Prozessüberwachungsgeschichte mehrfach Versuche, die manuelle Schweißerfertigkeit in Technik umzusetzen. Die umfangreichere Recherche in [39] schließt mit den Aussagen, dass der Körperschall ein zuverlässiger Informationsträger ist, jedoch die Ankoppelung der Detektoren am Werkstück mittels Koppelmedium nicht praxisgerecht ist.

Untersuchungen in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWU Dresden ermöglichten an Laborproben die Unterscheidung zwischen zu geringem, optimalem und zu großem Spalt. Die Schwingungsaufnehmer wurden an den Stahl-Druckstücken der Vorrichtung-Spannelemente angeklebt oder angeschraubt. Nach dem Einlernen der Spalt-Klassen konnten diese reproduziert werden. Wegen des hohen anfallenden Datenvolumens war jedoch die auswertende Klassenzuordnung sehr zeitaufwändig. Eine Portierung auf ein schnelles Echtzeitsystem wurde angestrebt, konnte jedoch nicht realisiert werden. Die Validierung an realen Bauteilen blieb aus. Für den Einsatz in der Fertigung besteht weiterhin Entwicklungsbedarf hinsichtlich:

- Vereinfachtem Einlernverfahren
- Unempfindlichkeit gegenüber Prozessschwankungen
- Schnellere Datenverarbeitung
- Nahtpositionsaufgelöste Ergebnissausgabe

2.2.3.4 Wichtige Laserschweißprozess-Überwachungssysteme

Tabelle 2-2 listet eine Auswahl wichtiger Laserschweißprozess-Überwachungssysteme auf. Weitere spezielle Systeme für die Überwachung von Lötprozessen (-Ergebnissen) oder für die Kunststoffverarbeitung werden hier wegen der Spezialisierung und Übersichtlichkeit nicht ge-

nannt. Entscheidend bei der Auswahl der letztendlich für die Untersuchungen genutzten Technik waren deren kommerzielle Verfügbarkeit, die Erfassung der Strahlungsgrößen (Abbildung 2-22) und die gute Möglichkeit zur kamerabasierten Prozessbeobachtung.

Anbieter	System	Pre-In-Post	Besonderheit
4D Ingenieurgesellschaft für Technische Dienstleistungen mbH	WeldWatcher	In	Laser Rückreflex Sensor im Lasergerät angeordnet, Signale kommen somit über die Arbeitsfaser vom Prozess zum Sensor
plasmo Industrietechnik GmbH	Observer	In	sichtbare Bereich und kurzwelliges Infrarot (siehe DIN 54190-3) „Prozesslicht über Glasfaser“
Precitec KG	Nahtverfolgungssystem (LPF)	Pre	koaxiales oder off-axiales Triangulationssystem
	Laser Welding Monitor (LWM)	In	Detektion von sichtbarer und reflektierter Strahlung sowie Temperatur-Strahlung Bis zu 8 Photodioden; extern und intern; + Kamera
	SOUVIS 5000 ¹	Post	Postprozess Oberfläche, Durchgangslöcher
Prometec GmbH	WELDING MONITOR PD 2000	In	koaxiale CMOS Kamera + Bildverarbeitung
	Plasma Monitor PM 7000	In	Plasmaleuchten, sichtbare Wellenlängenbereiche bis 4 Photodioden, extern über Lichtleiter
NISSAN EALA 2007	NISSAN Inline Monitoring System	In	Plasma, Laser-Rückreflex Auswertung durch FFT + WT
ThyssenKrupp Steel EALA 2007	Beam Control Optic (BCO) Electro-Magnetic-Ultrasonic-Sensor (EMUS)	Pre-In-Post	Lichtschnitt, Plasma, Lichtschnitt, Ultraschall Anwendung bei TWB
Permaneava	Permanova Laser Welding Tool System WT03	Pre-In-Post	Seam Tracking Module Process Monitoring Options Bis zu 3 Kameras + ein Power Meter im Strahlengang Spektrometer
TRUMPF EALA 2007	TRUMPF Process Control	Pre-In-Post	1 CMOS Kamera für Pre-, In- und Postprozess
Fraunhofer ILT	Coaxial Process Control (CPC)	In	koaxiale Kamera + Bildverarbeitung + Fremdbeleuchtung
Laser Zentrum Hannover	ProWatcher Multi	In	Infrarot, Ultraviolett, Laser-Rückreflex Entwickelt für Schweißen mit CO ₂ Laser
FGSW	Projekt INESS	Pre-In-Post	Ergebnisse realisiert in TRUMPF Process Control

Tabelle 2-2 Laserprozess-Überwachungssysteme (Auswahl)

¹ Vor dem 21. Dezember 2007 von Soutec Soudronic AG (Inhaltlich dem Abschnitt 2.2.2 zuzuordnen)

3 Nahteigenschaften

3.1 Übersicht der Nahtunregelmäßigkeiten

In der Anlage 10.1 - Nahtunregelmäßigkeiten an Laserschweißnähten ist ein Großteil der an Laserschweißnähten möglichen Fehler dargestellt. Die Basis für die Übersicht stammt aus den Jahren 2002 bis 2005 und wurde im Projekt MAINE IV, Teilprojekt D – Qualitätsüberwachung durch die beteiligten Projektpartner¹ erstellt. Zu diesem Zeitpunkt lagen bereits Erfahrungen über das Laserschweißen an verzinkten Stahl Fahrzeugkarosserien in der Großserienfertigung vor (Abbildung 2-2) und es erfolgte der Übergang von einzelnen Nähten je Karosserie zum lasergeschweißten Karosseriebau. Neben den eingebrachten Erfahrungen bildeten die Vorschriften und Normen [117][118][119] in den damaligen Ausgaben, die Quellen für die Übersicht. Eine Überarbeitung und Ergänzung war notwendig und ist erfolgt. Betroffen sind sowohl die Fehlerarten, als auch mögliche Ursachen und Gegenmaßnahmen. Eine Bewertung der Fehler nach Wichtigkeit ist in der Tabelle nicht gegeben, wird aber im Folgenden zusammengefasst:

1. Insbesondere die aus Sicht der Insassen- und Fahrzeugsicherheit relevanten Fehler bekommen in der Fertigungs- und Qualitätssicherungspraxis höchste Aufmerksamkeit. Obwohl nach [118] nicht gefordert, wird stets eine gut ausgebildete Nahtwurzel angestrebt. Bei zu starken Nahteinfall, starken Nahtauswürfen und „geschnittenem Oberblech“ ist Nacharbeit zwingend. Die Einschätzung erfolgt durch Sichtprüfung. Die Prüfung auf innere Fehler wie fehlende Anbindung („falscher Freund“) erfolgt durch Impuls-Wärmefluss-Thermografie.
2. Für Kunden sichtbare Fehler werden ebenfalls nicht toleriert. Wie die meisten Fügestellen anderer Verfahren sind auch die Laserschweißnähte bei Volkswagen Fahrzeugen konstruktiv in nicht sichtbare Bereiche gelegt. Ausnahmen bilden die Laserlötnähte an den Dach-Seitenteil Verbindungen und an Heckklappenausschnitten. Sichtbare Fehler sind auch hier nicht zulässig.
3. Unregelmäßigkeiten wie kleinere Oberflächenporen, Löcher, Schmelzenauswürfe, anhaftenden Spritzer sowie Anfangs- und Endkrater haben hauptsächlich Auswirkungen auf Dichtigkeit, Korrosion und Optik. Diese Nähte werden mit Feinabdichtung versiegelt. Die Unregelmäßigkeiten haben somit vor allem wirtschaftliche Auswirkungen.
4. Wie bereits im Abschnitt 1 dargelegt, spielen Fehlerarten die auf die Stahlgrundwerkstoffseitige Schweißbeignung zurückzuführen sind und beispielsweise zu Heißrisen, Kaltrissen oder Härtespitzen, -verlusten führen, kaum eine Rolle.

Entsprechend dieser Einteilung liegt das Hauptaugenmerk auf Unregelmäßigkeiten bzw. Fehlern nach 1 und 3.

3.2 Einflüsse auf Nahteigenschaften

In der Tabelle Fehler-Ursachen-Parameter (Anlage 10.2) liegt eine Ursachen-Relevanz-Bewertung für die Unregelmäßigkeiten gemäß Anlage 10.1 vor. Weiterhin können die Einflüsse auf die Schweißergebnisse grob in vier+eins Gruppen eingeteilt werden und sind im folgenden mit einigen konkretisierenden Beispielen aufgeführt. Die Sauberkeit wurde als +eins hinzugenommen, da die Forderung nach hoher Sauberkeit eine Voraussetzung in höchsttechnisierter Qualitätsfertigung ist. Andererseits erfordern die verwendeten Materialien bei der vorangegan-

¹ Volkswagen Sachsen GmbH

- imq - Ingenieurbüro Materialprüfung/Qualitätssicherung GmbH Crimmitschau,
- Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (FhG IWU) Chemnitz und Dresden
- KWS - KUKA Werkzeugbau Schwarzenberg
- TRUMPF Laser GmbH + Co. KG Schramberg

genen Umformung eine Beölung. Beim Schweißprozess selbst entstehen Verunreinigungen für Bauteile und Anlagen.

- **Werkstoffseitige Parameter (Gruppe 1)**
 - Schweißbarkeit Grundwerkstoffe
 - Gefügezustände
 - Wärmeleitfähigkeit
 - Wärmedehnung
 - Beschichtungsart
 - Beschichtungsdicke
 - Schmelz- und Verdampfungstemperaturen
 - Festigkeit, Härte
 - ...
- **Bauteilseitige Parameter (Gruppe 2)**
 - 3D-Geometrie
 - Maß- und Form Toleranzen
 - Blechdicken und Blechdicken-Toleranzen
 - Paketdicken
 - Steifigkeit
 - Nahtarten, -längen, -formen
 - Nahtlagen
 - Zugänglichkeiten
 - Entgasungsvorbereitung
 - ...
- **Vorrichtung: Positionieren, Bestimmen, Spannen (Gruppe 3)**
 - Spannlage
 - Methode der Schweißspalt Einstellung
 - Entfernung der Schweißstellen von den Bestimmelementen
 - Stationäre oder mitlaufende Spanntechnik
 - Anzahl und Formen der Spannelemente (Druckstücke)
 - Entfernung der Schweißstellen zu den Spannelementen
 - Einseitige Rollen, Doppelrollen, -Finger, Entgasungsscheiben
 - ...
- **Prozessseitige Parameter (Gruppe 4)**
 - Laserleistung
 - Verfahrensgeschwindigkeit
 - Fokusbereich
 - Fokusslage
 - Strahlqualität
 - Strahlprofil
 - Einstrahlwinkel
 - Schutzgase
 - ...
- **Sauberkeit bzw. Verunreinigungen an (Gruppe +1)**
 - Bauteilen
 - Vorrichtungen
 - Schutzgläsern, Optiken

Die in Laboren und bei der Einrichtung von Fertigungsanlagen üblicherweise angewendete Vorgehensweise zur schnellen Erzielung von iO-Nähten ermöglicht eine Wichtung der vielfältigen Einflüsse.

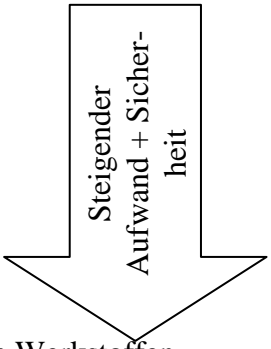
1.	Bestimmen der Bauteillage im Raum und zueinander unter Beachtung der Nahtlagen und deren Zugänglichkeiten.
2.	Realisieren des Entgasungspaltes bei beschichteten Werkstoffen <ul style="list-style-type: none"> • „Naturspalt“ • thermomechanisch • Presswerksnoppen • konstruktive Keilspalte • Entgasungsscheiben (Spreizrad bzw. Trennscheibe) • Lasernoppen • Spaltband  Realisierung des 0-Spaltes bei unbeschichteten Werkstoffen
3.	Spannen nahe der vorgesehenen Schweißstellen
4.	Erstellen der Roboterprogramme bei Beachtung von <ul style="list-style-type: none"> • Fokusslage • Einstrahlwinkel • Gleichförmigkeit der Geschwindigkeit während der Nähte • Leistungsrampen
5.	Festlegen der Laserleistung oder Schweißgeschwindigkeit
6.	Festlegung Schutzgas ¹
7.	Erstschweißung + Begutachtung
8.	Variation der Schweißgeschwindigkeit oder der Laserleistung bis zum gewünschten visuellen Ergebnis. (In Ausnahmefällen: leichte Korrektur der Fokusslage)
9.	Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfung auf innere Fehler und Festigkeit.

Tabelle 3-1 Vorgehensablauf zur Erzielung von iO-Nähten

¹ Da im Karosseriebau weitestgehend ohne Schutzgase lasergeschweißt wird, wurde dieser mögliche Einflussfaktor vernachlässigt.

Mit Erfahrung und Ingenieur-Intuition sind 1. bis 8. für Stahl-Anwendungen im Allgemeinen sehr schnell durchschritten. Als wichtigste relevante Fehlerquelle verbleibt Punkt 2.. Keine der genannten Möglichkeiten ist aufwandsfrei und sicher zugleich. Besonders bei 3- und Mehrblechverbindungen und nur einseitiger Zugänglichkeit steigt die Unsicherheit. Zunehmend ist durch den Einsatz von hoch- und höchstfesten Werkstoffen die Verformbarkeit der Bauteile um die Fügestellen so gering, dass die Kräfte der Spannmittel nicht ausreichen oder die Bauteile in angrenzenden Bereichen außer Maß geraten würden.



Abbildung 3-1 höchste Prozessanforderungen: Verschweißen von warmumgeformten bzw. pressgehärteten Karosserie-Strukturbauteile

3.3 Thermische Verformung, Schrumpfung, Eigenspannungen, Verzug

Das Laserstrahlschweißen gilt weithin als ein thermisches Fügeverfahren zum Nahtschweißen mit vergleichsweise geringer Energieeinbringung (Streckenenergie) und somit geringem resultierendem Bauteilverzug. In Relation zu den Lichtbogenschweißverfahren wie MIG und MAG besteht ein direkter Zusammenhang zum aufgeschmolzenen und wiedererstarteten Nahtvolumen. Gegenüber dem Widerstandspunktschweißen von Karosseriebaugruppen kann der Verzug von Laserschweißbaugruppen jedoch erheblich größer sein.

In [37] sind die Mechanismen für, aus dem Schweißprozess resultierenden Eigenspannungen, Schrumpfung und Verzug anschaulich aufgezeigt. Die zeitlichen lokalen Temperaturdifferenzen sind die Ursache für die Eigenspannungen in geschweißten Bauteilen und deren Verzug.

Bei lasertypischen parallelen Nahtbreiten über die gesamte Nahttiefe verbleiben Längs- und Quereigenspannungen im Bauteil, welche zu lokalen Schrumpfungen und zu globalem Verzug führen. Zur Vorausberechnung des Verzugsverhaltens von Schweißgruppen stehen Simulationswerkzeuge zur Verfügung. Diese ermöglichen die softwaretechnische Optimierung der Schweißfolgen und die Ermittlung eventueller Vorhaltemaße in den Umformwerkzeugen. Damit wird die Abbildung und Realisierung geometrisch passgenauer Karosseriekomponenten angestrebt. Die exakte Simulation der Bedingungen an jeder einzelnen Schweißnaht für jede Position und jeden Zeitpunkt wird nicht erreicht. Zur Erreichung genauerer Berechnungsergebnisse müssen die gesamten Werkstoff- und Bauteilhistorien einbezogen werden. Die aus dem Walzen der Bleche, dem Umformen und Schneiden der Bauteile ins Material initiierten inneren Spannungen, vor-

handene Texturen und Anisotropien sind zu berücksichtigen. Auch die Änderungen dieser Eigenschaften während unterschiedlicher Lagerzeiten bei verschiedenen Temperaturverteilungen und –verläufen können Abweichungen vom Simulations- zum Realergebnis verursachen.

Sobald dann der thermische Prozess beginnt, setzen Fernwirkungen auf entfernte Bauteilabschnitte ein. Eigene Untersuchungen zur thermisch induzierten Verformung beim Laserstrahlschweißen belegen die Schnelligkeit und Fernwirkung der einsetzenden Mechanismen. Den verwendeten Versuchsaufbau zeigt schematisch die Abbildung 3-2. An den Proben wurden 4 Nähte geschweißt. Beidseitig der letzten Naht war ein elektromechanisches Messtasteroktett angeordnet, mit welchem die Verformungsverläufe beider Bleche und die resultierende Gesamtdicke gemessen wurde.

Die Messergebnisse dieses einfachen Fallbeispiels zeigen, dass bereits das Schweißen der zweiten und der dritten Naht verformenden Einfluss auf den Blechbereich der vierten Naht hat. Der Verlauf, die Beträge und die Richtungen der Verformungen bei weiteren Proben weichen teilweise erheblich ab. Nach der vierten Naht ergaben sich bleibende Dickenänderungen und Gesamtverformungen (an den Tastern) von bis zu 40 µm.

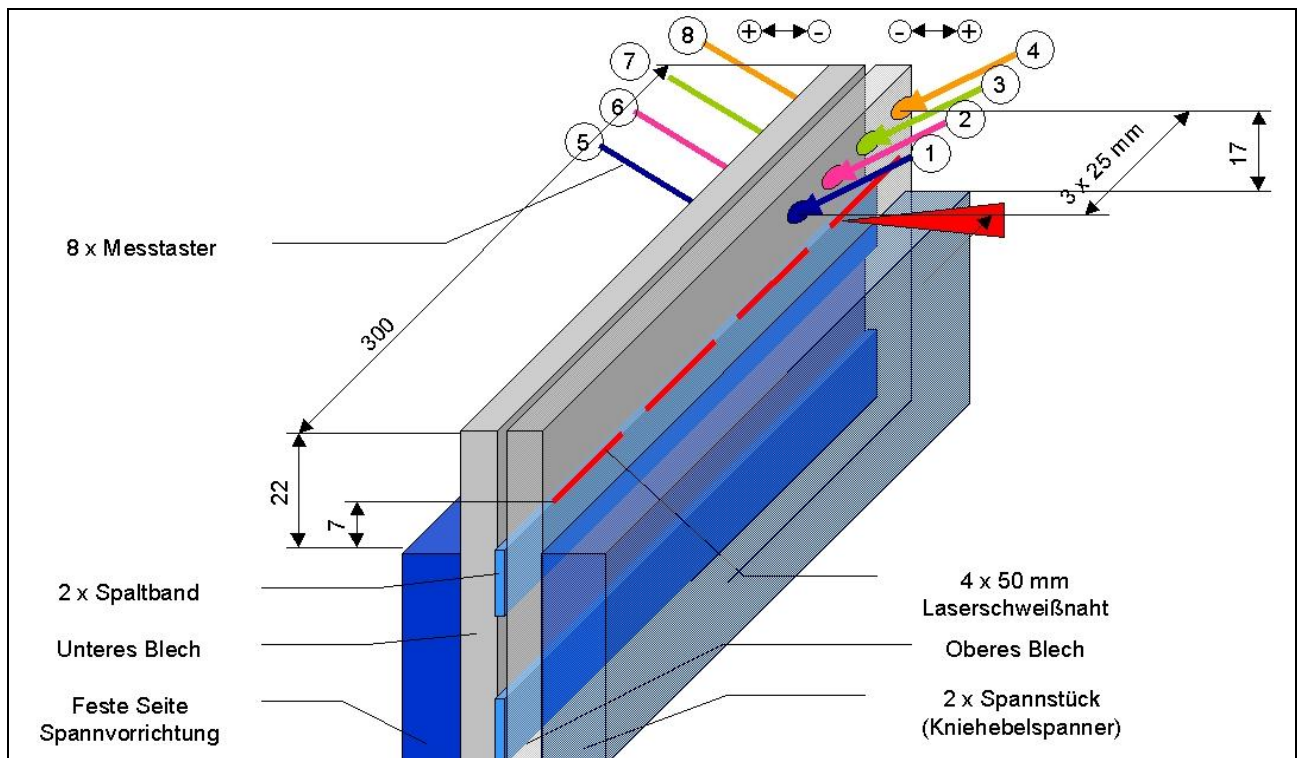


Abbildung 3-2 Messung thermischer Verformungen – schematischer Versuchsaufbau

Der schweißtechnisch bedingten Winkelverzügen an Profil-T-Stoßverbindungen wurde in [38] untersucht: „Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ausbildung des Schweißverzuges nicht unerheblich viel Zeit benötigt. Insbesondere bei der Verwendung austenitischer Stähle mit entsprechend geringer Wärmeleitfähigkeit vergingen 30 min, bis der endgültige Winkelverzug erreicht wurde.“

Bedingt durch Werkstoff-, Umgebungs- und Prozesstoleranzen können solche Abweichungen gerade bei komplexeren dreidimensionalen Bauteilen noch stärker auftreten. Eine zuverlässige passive oder aktiv geregelte Vorhersage der Spaltverhältnisse ist unmöglich. Selbst sehr massive und kostenintensive Spanntechnik kann den Serienprozess nicht 100%ig sicherstellen. Die Kontrolle und Überwachung der erzielten Schweißnaht- bzw. Bauteilqualität ist unumgänglich.

4 Problemstellung, Zielsetzung und Systematik zur Lösungsfindung

4.1 Problemstellung

Die zentrale Herausforderung beim Strahlschweißen oberflächenbeschichteter Stahlfeinbleche ist das Einstellen und Halten des zur Entweichung des beim Schweißen verdampfenden Zinkes notwendigen Spaltes zwischen den Fügepartnern (I-Naht am Überlappstoß). Erfahrungen verschiedener Quellen und Angaben aus der Literatur geben Bereiche von 0,05 mm bis 0,3 mm an. Die untere Grenze ist durch die noch akzeptablen Spritzer und Auswürfe des Grundmaterials und die obere Grenze durch die maximal zulässigen Nahtunterwölbung/Wurzelrückfall und die damit sinkende kleinste gemeinsame Nahtdicke gegeben. Bei noch größerem Spalt entstehen getrennte Blindnähte, d. h. vom äußeren Anschein sind die Schweißnähte vorhanden, haben jedoch keine innere Verbindung miteinander („Falscher Freund“). Eine Absicherung stets reproduzierter stabiler Prozessbedingungen ist nicht möglich (3.3) und somit die regelmäßige oder durchgängige Kontrolle der Bauteilqualität erforderlich.

Die Prüfung und Zuordnung aller real entstehenden inneren und äußeren Schweißnahtmerkmale und deren gegenseitiger Zulässigkeiten erfordert mehrere Prüfmethoden, ist nicht zerstörungsfrei, nicht automatisiert und ist personalintensiv. Die etablierten Kontroll- und Überwachungsmethoden sind im Abschnitt 2.2 aufgeführt. Die zulässigen Nahtmerkmale sind katalogisiert und in ihren Grenzen beschrieben (Abschnitt 3 und [117]). Eine Übersicht darüber, mit welchen Arten von Sensoren sich prinzipiell welche Nahtmerkmale erfassen oder vorhersagen lassen, ist in der Anlage 10.2 gegeben.

Trotz z. B. der Arbeiten [39][40][41][42] arbeiten marktgängige Prozessüberwachungen von Emissionen und Ereignissen aus dem Schweißvorgang noch immer nach dem Toleranzbandprinzip. Dies bedeutet, dass für mehrere Gutschweißungen die Signalpegelverläufe aufgezeichnet werden, von dieser Kurvenschar werden eine Mittelwertkurve, eine obere und eine untere Grenzwertkurve berechnet. Die Signalpegelverläufe der Serienschweißungen müssen dann innerhalb dieser Grenzen liegen, bzw. dürfen diese nur nach vorgegebenen Regel über- oder unter-

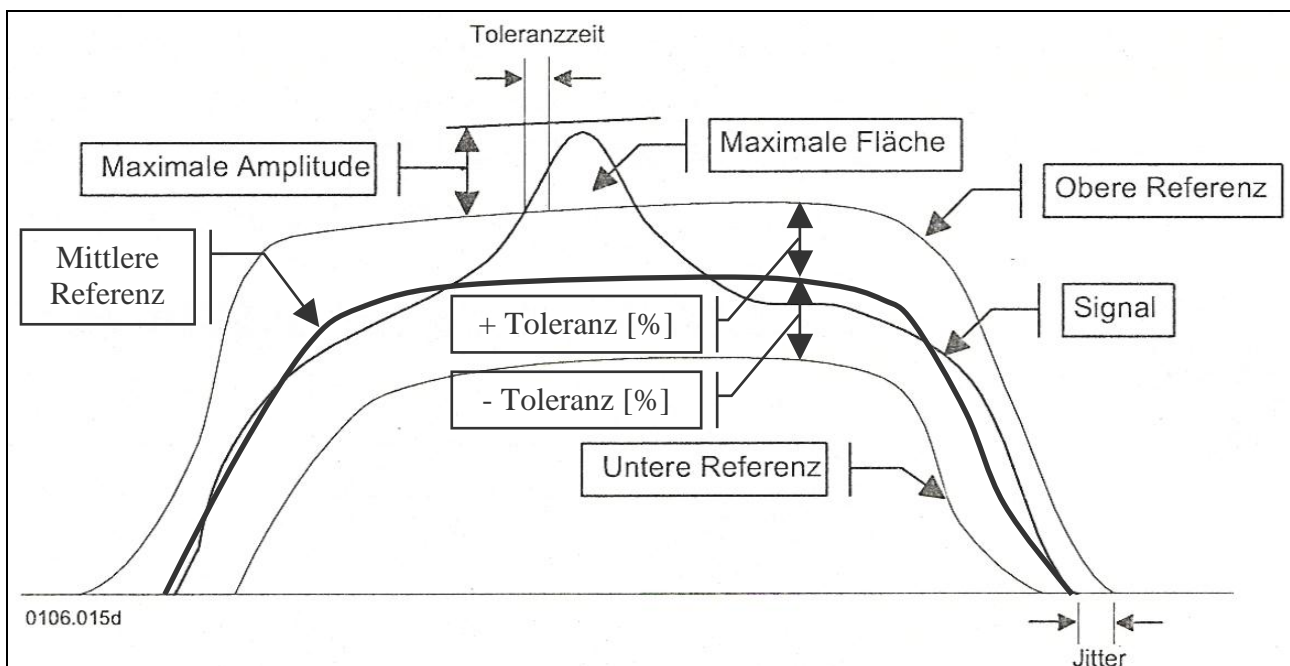


Abbildung 4-1 Precitec-LWM: "Signal-Charakteristik - Fehlerverarbeitung" [43]

schreiten (Abbildung 4-1).

Konkrete Aussagen über die in der Wechselwirkungszone und der Schmelzzone abgelaufenen Vorgänge und die in der erstarrten Schmelze „eingefrorenen“ Merkmale sind kaum möglich. Eine Fehlerklassifikation ist nur bedingt möglich.

4.2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Prozessüberwachung mit Merkmals- bzw. Fehlerklassifikation für das Laserschweißen in der Nahtform I-Naht am 2-Blech-Überlappstoß von Karosserieblechen aus Stahl. Der fehlende Baustein, das weiße Feld aus Abbildung 2-12 (Seite 14) ist mit einem praxistauglichen und analytisch belegten Verfahren zu füllen. Es soll eine Fehlerklassifikation ermöglicht werden, die an die heranzuziehenden Vorschriften eng angelehnt ist.

Dazu wird der Prozess in seinem Verlauf und Ergebnissen beobachtet und analysiert. Die Sensoren, Mittel und Methoden zur Erfassung und Verarbeitung der Signale sollen einfach und komfortabel handhabbar, reproduzierbar und kostengünstig in der Anschaffung und Nutzung sein.

Aus den Prozessemissionen werden signifikante Indizien gewonnen, um eine Prognose und orts aufgelöste Zuordnung der entstandenen Nahtmerkmale zu ermöglichen. Die Keyhole- und Schmelzengeometrie wird beobachtet, aufgenommen, gemessen und ausgewertet. Mögliche Abhängigkeiten werden erfasst, dargestellt und für eine programmierte Auswertung aufbereitet.

Auf Basis der Beobachtungen und der korrelierten Signale wird ein schematisches Modell aufbereitet. Mit der Modellbildung sollen die Fragen beantwortet werden, welche Vorgänge im Prozess, der Dampfkapillare, dem Schweißspalt und der Schmelze welche Schweißergebnisse bewirken und dabei welche Verlaufsmuster und Größenordnungen der Signale haben. Somit wird die Plausibilität der Zusammenhänge der Signale aus dem Prozess mit den entstandenen Merkmalen nach dem Prozess untermauert.

Im Ergebnis werden für 2-Blechverbindungen hinreichend exakte Korrelationen zwischen den Ergebnissen des Bewertungsalgorithmus und den realen Nahteigenschaften je Nahtmillimeter angestrebt. Die Modelldarstellungen der jeweiligen Prozesszustände sollen die bisherigen Vorstellungen dieses Laserschweißprozesses ergänzen.

4.3 Systematik zur Lösungsfindung

Zum Beginn der Untersuchungen waren bereits Wissen und vertiefte Erfahrungen zum Laserprozess, zur Ermittlung und Einstellung optimaler Verfahrensparameter und zu deren Grenzwerten vorhanden.

Auf Grund dieser Kenntnisse standen zunächst die Analyse und Optimierung der Methoden und Techniken zur Prozesssignalerfassung der Emissionen und Vorgänge im Vordergrund und beinhalteten:

- a) Die ingenieurtechnische Analyse der Potentiale der verwendeten Basistechnik (Gliederungspunkt 5.1) zur Aufnahme der elektromagnetischen Emissionen bei verschiedensten Prozesszuständen.
- b) Die Qualifizierung der kamerabasierten Prozessbeobachtung der Dampfkapillare, der Schmelze mit und ohne Zusatzbeleuchtung koaxial und gewinkelt zum Arbeitslaserstrahl.

In der Iteration von a) und b) und zahlreiche Versuchsschritte wurde die Problematik eingekreist, die Erkenntnisse vertieft und erneuert. Den Arbeitsplan – eine Übersicht der wesentlichen durchgeführten Forschungsarbeiten, der bedingenden Vorbereitungen und erzielten Ergebnisse wird in Anlage 10.4 dargestellt.

5 Durchgeführte Untersuchungen

5.1 Basistechnik

5.1.1 Laserstrahlquelle

Für die meisten Untersuchungen diente ein lampengepumpte Nd:YAG Stablasers HL 4006 D der Firma TRUMPF Lasertechnik als Strahlquelle mit 4000 W Leistung am Werkstück. Die Strahlführung erfolgt mit einem 600 μm Durchmesser -Lichtwellenleiter (LWL). Die Wellenlänge der Strahlung ist 1064 nm, die Strahlqualität beträgt 25 mm*mrad.

5.1.2 Bearbeitungswerkzeug und Sensoren

Die Abbildung 5-2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des verwendeten Laserbearbeitungskopfes YW50, die ungefähre Anordnung der 4 integrierten Photodioden und den Strahlengang zur CMOS Kamera inklusive Irisblende und optische Filter. Der Bearbeitungskopf realisiert eine 1:1 Abbildung des Faserendes auf die Werkstückoberfläche mit einem Arbeitsabstand von 200 mm. In Abbildung 5-1 ist am realen Bearbeitungskopf der Vorverstärker („Head Monitor“) für die empfangenen Signale zu sehen. Abbildung 5-3 zeigt das Kameraanschlussmodul, zu sehen ist der Irisblendenhebel und die Möglichkeit zur Justierung des Kamerabildfeldes und zur Einstellung der Bildschärfe durch Z-Verschiebung des C-Mount Klemmringes auf dem Tubus des Anschlussmoduls.

Eine Herstellerdarstellung des verwendeten Bearbeitungskopfes und der internen Anordnung der 4 Sensoren zeigt Abbildung 5-4. Die Abbildung 5-6 veranschaulicht die Sichtbereiche der 3 Prozessabbildenden Photodetektoren.

- **Der R-Laserstrahlungs-Rückreflex-Detektor erfasst die in der Dampfkapillare in Richtung Bearbeitungskopf rückreflektierte Laserleistung bei der Laserstrahlungswellenlänge 1064 nm.**
- **Der T-Temperatur-Detektor erfasst die infraroten Strahlungsanteile im Wellenlängenbereich von 1100 bis 1800 nm aus dem Umfeld der Dampfkapillare. Diese selbst ist durch eine negative Blende von der Abbildung auf die Sensorfläche ausgeschlossen.**
- **Der P-Plasma-Detektor empfängt die Lichtemissionen aus dem Metaldampf in der Dampfkapillare und darüber. Er ist für die Wellenlängen von 400 bis 600 nm ausgelegt [59].**
- **Der L-Laser-Detektor bildet die Primärstrahlung ab.**

Die Farben Blau für Rückreflex (R), Magenta für Temperatur (T), Grün für Plasma (P) und Cyan für Laser (L) werden in allen nachfolgenden Abbildungen und Diagrammen verwendet.

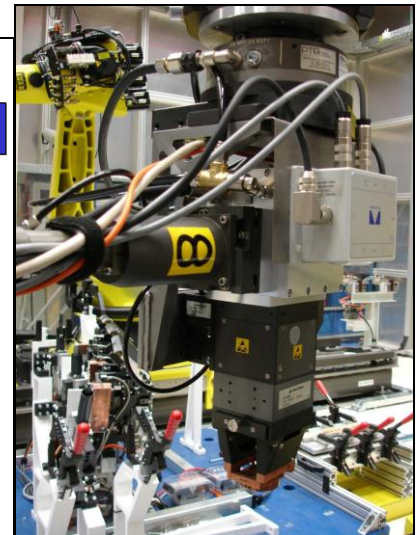
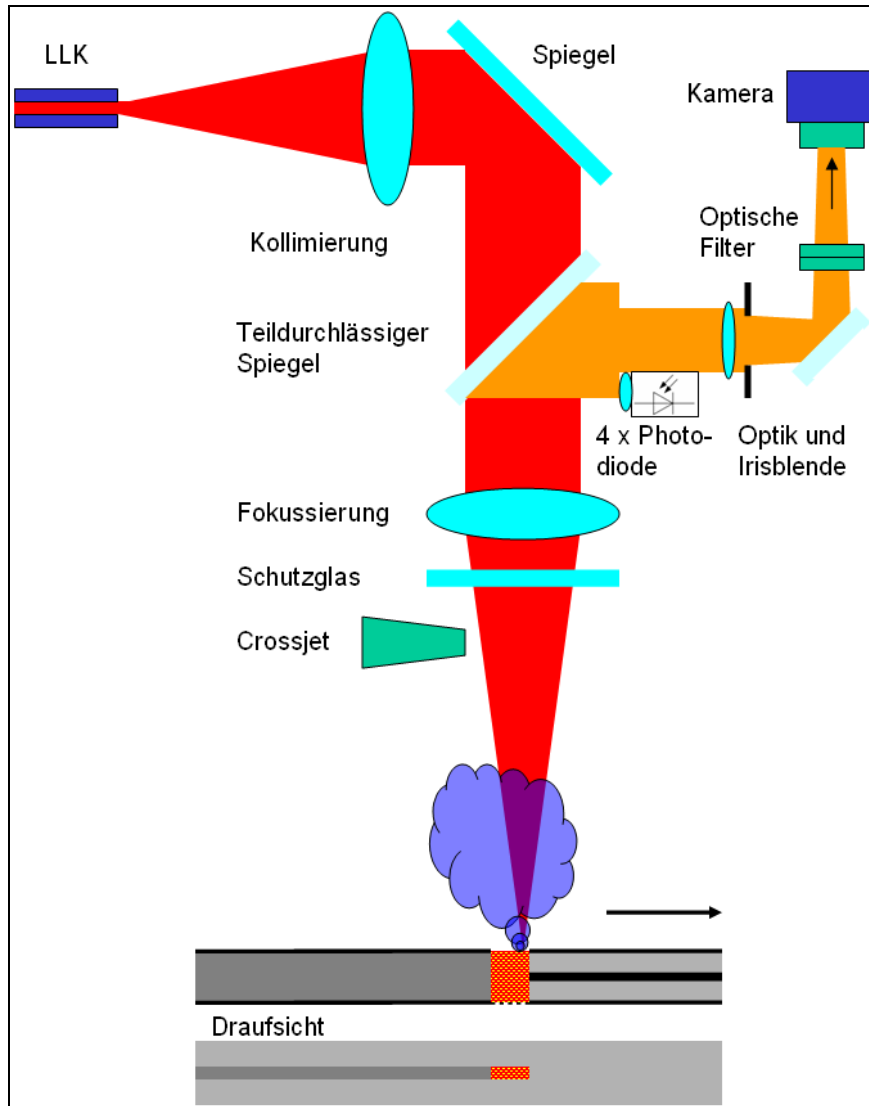


Abbildung 5-1 verwendeter Bearbeitungskopf



Abbildung 5-3 Kameraanschlussmodul mit Kamera

Abbildung 5-2 Prinzipieller optischer Aufbau des verwendeten Bearbeitungskopfes

Die Photodetektoren liefern keine normierten absoluten Energie- oder Leistungswerte der empfangenen Strahlungen. Je nach Empfindlichkeit der einzelnen Detektoren und der eingestellten Hard- und Softwareverstärkungen werden Signalpegel zwischen 0 bis 10 V im Laser Welding Monitor (LWM) aufgezeichnet (Abbildung 5-9). Die Vorverstärkung lässt sich hardwareseitig durch Schalter in Zehnerpotenzstufen im Head Monitor einstellen. Eine weitere softwareseitige Verstärkung erfolgt in der Prozesskonfiguration der LWM-Software. Somit werden die aufzuzeichnenden analogen Signalpegel auf einen mittleren 5 V Wert eingestellt.

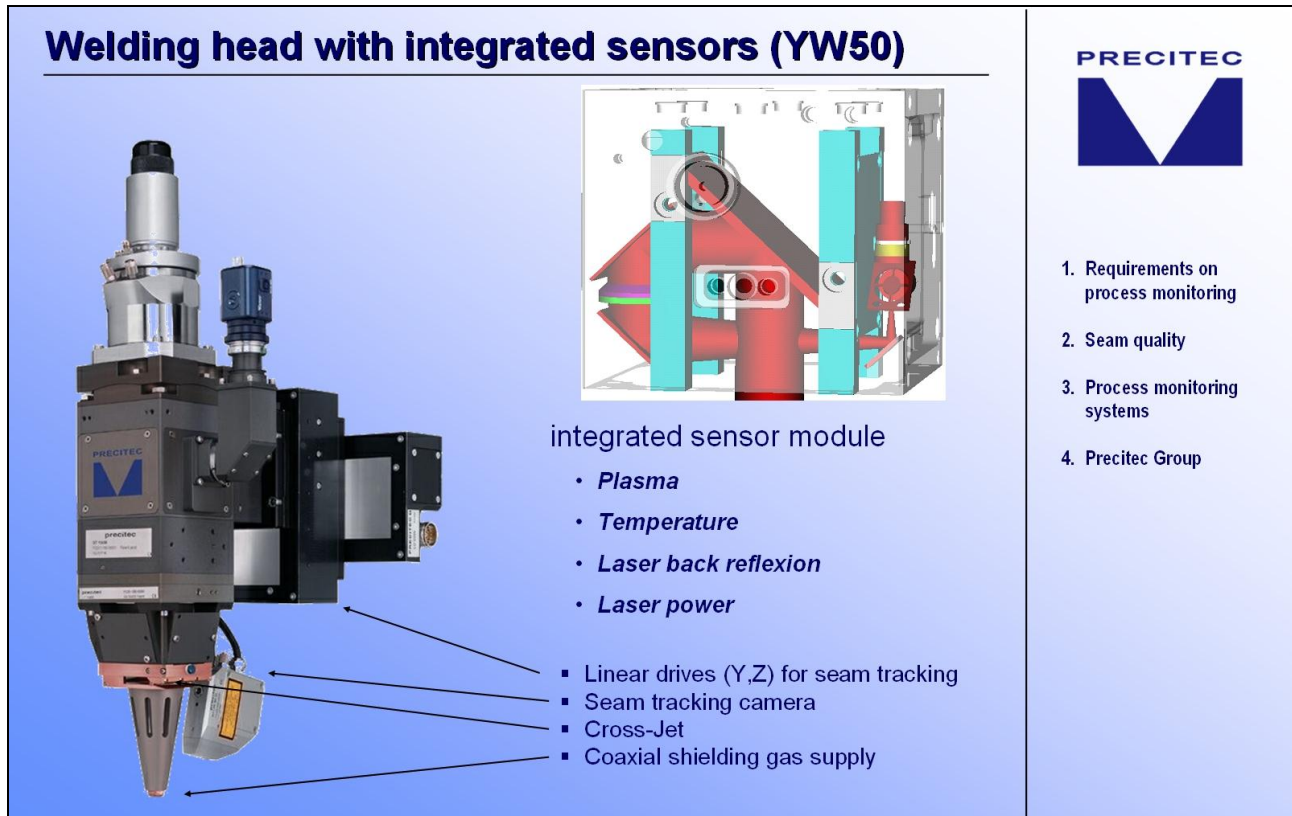


Abbildung 5-4 Lichtwege zu den Sensoren im YW50 [44]

5.1.3 Kamera

Es wurde die CMOS Kamera DALSA 1M-28 für die Prozessvisualisierung verwendet. Die technischen Daten des Kamerasensors und dessen spektrale Empfindlichkeit zeigen Tabelle 5-1 und Abbildung 5-5.

Anzahl Pixel	1024 x 1024
Pixelgröße	10.6 μm x 10.6 μm
Sättigungskapazität	200 000 Elektronen
Verschlussmodi	Global
Füllfaktor	35 % (nur Diodenfläche)
Quanten-Empfindlichkeit	2 μV /Elektron (8 μV /Elektron mit Verstärkung)
Inpixel programmierbare Verstärkung	~4x
Antwortverhalten	linear, LinLog TM , logarithmisch
Dynamikbereich	48 dB linear (8 bit); 120 dB LinLog2 TM
Quantenwirkungsgrad	25 %
Belichtungszeit	1 μs —0.5 s in Schritten von 35 ns
Empfindlichkeit	10 $\mu\text{J}/\text{m}^2/\text{LSB}$ @630 nm, 8 bit
Spektralbereich	400 – 800 nm
Anzahl der Ausgänge	1 or 4

Tabelle 5-1 Kamera Sensor Charakteristik [49]

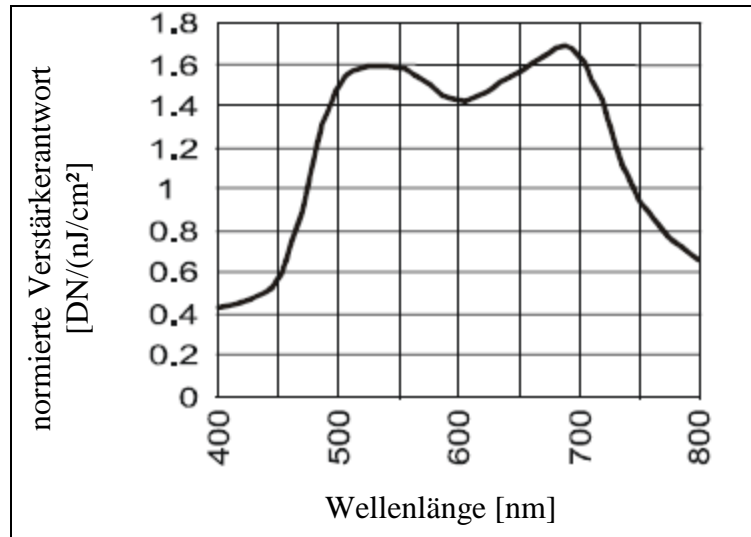


Abbildung 5-5 Spektrales Antwortverhalten des Kamerasensors [49]

Die Datenübertragung zum Auswertecomputer erfolgt durch maximal zwei je 10 m lange Cameralink Kabel und einen zwischengeschalteten Repeater. Für die Verarbeitung im Computer sorgt eine Framegrabberkarte microEnable III von Silicon Software.

Wichtig in dieser Konfiguration ist die Möglichkeit zum Einstellen einer linear-logarithmischen Empfindlichkeitskennlinie. Damit können trotz der hohen dunkel-hell Kontraste zwischen Blechoberfläche, Schmelze und Metaldampffackel in und über der Kapillare noch Details darin erfasst werden. Weiterhin bietet die Kamera die Möglichkeit die Grauwerte mit 10 Bit „Farbtiefe“ aufzuzeichnen und zu übertragen. Vor der Weiterverarbeitung in 8 Bit Grauwerttiefe kann im Framegrabber das Startbit auf 0, 1 oder 2 ausgewählt werden. In der Kombination der möglichen sehr kurzen Belichtungszeiten (0,01 ms) und der Einschränkung der Region of interest (ROI) wurden Bildraten von über 5000 je Sekunde erreicht.

5.1.4 Spektrale Einordnung und Sichtbereiche der Sensoren

Um Zusammenhänge von detektierten Emissionen und Vorgängen im Schweißprozess finden zu können, wurden die Empfindlichkeitsbereiche der verwendeten Sensoren und der bandpassgefilterten CMOS Kamera im Planckschen Strahlungsspektrum spektral zugeordnet (Abbildung 5-7). Wegen des großen darzustellenden Temperaturbereiches von schmelzendem Zink (692,73 K) bis zu siedenden Eisen (3023 K), wurde die doppelt logarithmische Darstellung verwendet. Unter der Voraussetzung, dass sich warm-heißer Stahl in seinen Emissionen wie ein schwarzer Strahler verhält, ist bei dieser idealisierten Vorstellung für den Einblick in die Dampfkapillare ersichtlich, dass:

- die maximalen Emissionen (Spektrale spezifische Ausstrahlung, $W(m^2 \mu m)$) des siedenden Eisens um $\lambda \approx 1 \mu m$, also etwa bei der verwendeten Laserwellenlänge vorliegen
- Emissionen des schmelzenden Eisens bei allen Sensoren durch Emissionen des siedenden Eisens überstrahlt werden um die Faktoren:
 - Plasma: (mittig, bei $\lambda \approx 0,5 \mu m$) ca. 10^3
 - CMOS: ca. 10^2
 - Laser: < 10
 - Temperatur: ca. 10
- Emissionen des Zinks sind vollständig vernachlässigbar.

Im Gegensatz zur theoretischen Annahme in Abbildung 5-7 haben die gemessenen Emissionen in Abbildung 2-23 (Seite 24) ihr Maximum bei ca. 600 nm.

Abbildung 5-6 zeigt die „Sichtbereiche“ der verwendeten Photodetektoren. Der R-Rückreflex-Detektor ist auf den unmittelbaren Bereich der Dampfkapillare ausgerichtet. Dem T-Temperatur-Detektor ist eine „negative“ Blende vorgeschaltet, welche die Abbildung der Dampfkapillare auf den Sensor unterdrückt. Demzufolge empfängt dieser die Emissionen der flüssigen Schmelze. Der P-Plasma-Detektor erfasst in seinem Wellenlängen-Empfindlichkeitsbereich die gesamten Emissionen der dargestellten Werkstückoberfläche. Dies sind die Ausstrahlungen des Metaldampfes.

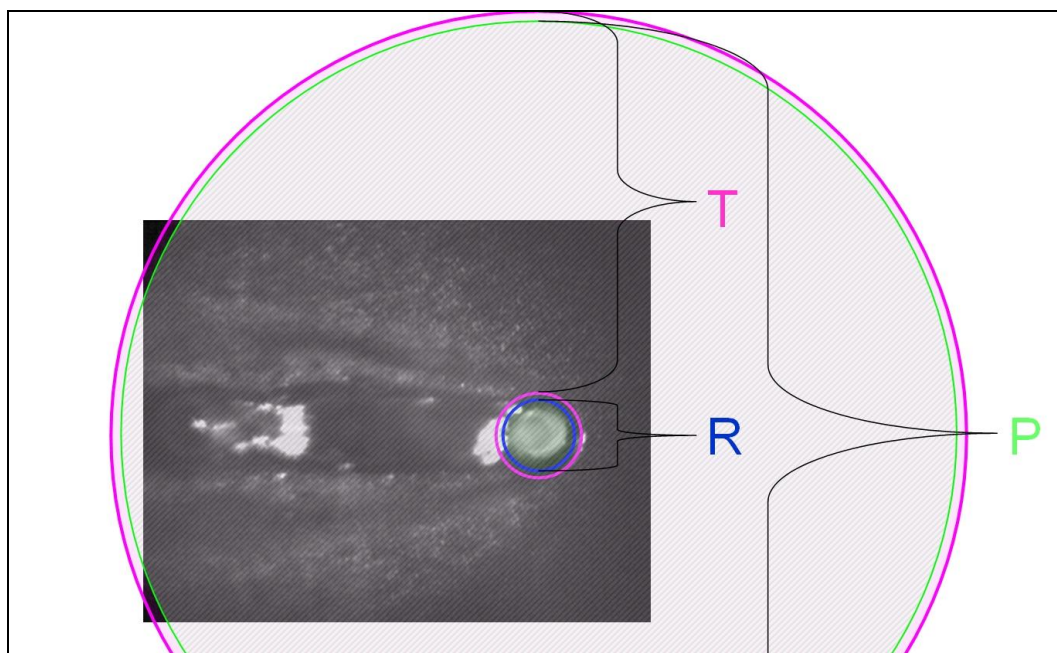


Abbildung 5-6 Sichtbereiche der RTP-Photodetektoren

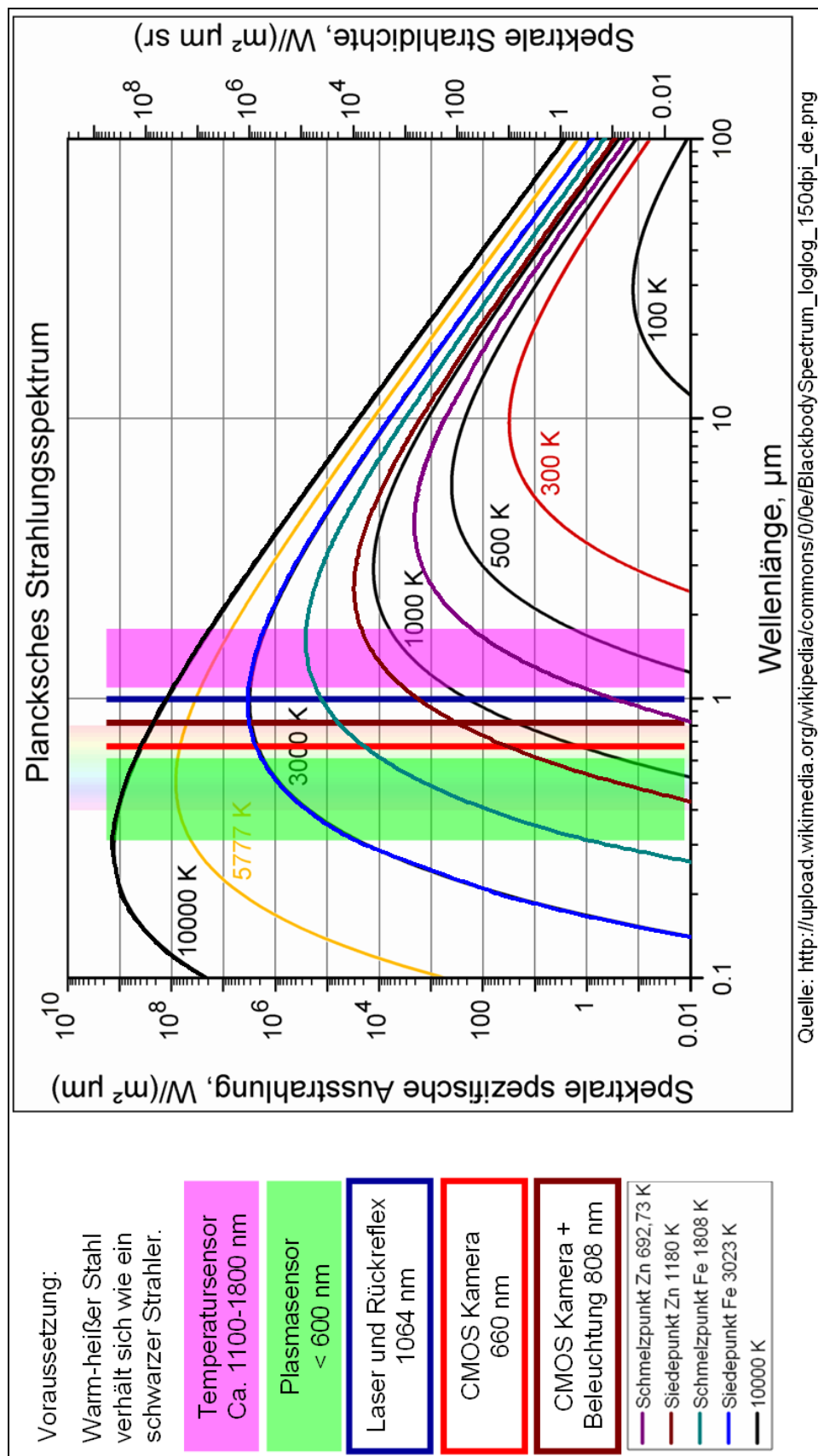


Abbildung 5-7 Spektrale Einordnung der YW50 Sensoren im doppelt logarithmisch aufgetragenen Planckschen Strahlungsspektrum

5.1.5 Laserzelle und Roboter

Für die Untersuchungen stand eine Laserzelle mit zwei 6-Achs Robotern KUKA VKR180 als Führungssystem für das Laserbearbeitungswerkzeug zur Verfügung. Die Roboter sind auf einer zusätzlichen siebenten Achsen fahrbar und eine achte Linearachse sorgt für besonders gleichmäßige Bewegungen für lange gerade Schweißnähte (Abbildung 5-8).

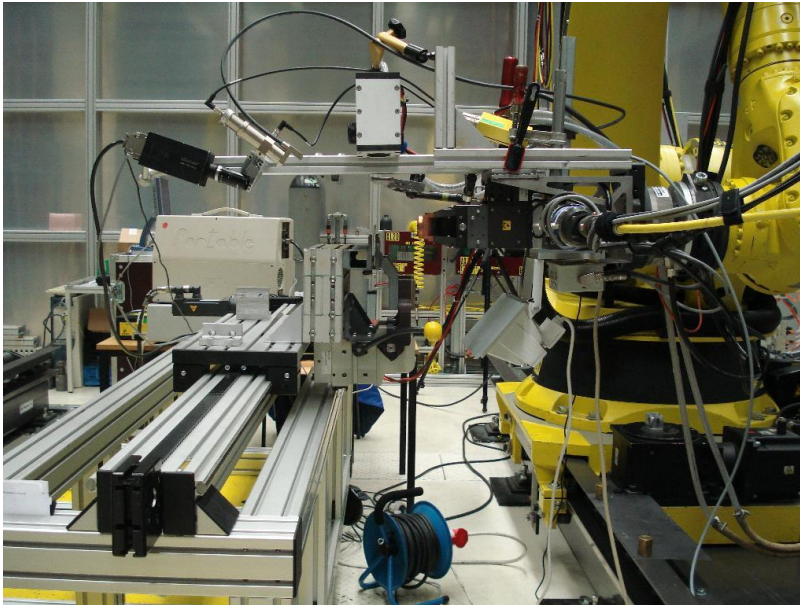


Abbildung 5-8 Laserzelle mit zwei Robotern und Linearachse
(Bezeichnung der Komponenten Seite 73)



Abbildung 5-9 LWM

5.2 Inprozess Untersuchungen – Schwerpunkt Photodetektoren

Diese Untersuchungen gliedern sich gemäß der in 4.3 entwickelten Vorgehensweise in den Punkt a) (Ingenieurtechnische Analyse ...) ein. Zunächst galt es, die etablierte Prozessüberwachung nach der Toleranzbandmethode zu analysieren, deren Grenzen und Potentiale auszuwerten und aufzuzeigen (Abschnitt 5.2.1). Anschließend erfolgen weitere Untersuchungen zu Zusammenhängen von Einflussgrößen mit Signalen bei unterschiedlichen Prozess- und Materialkonstellationen. Mit der Einführung der Millimeterpegel (Kapitel 5.2.5, Seite 54) wird eine Möglichkeit aufgezeigt, aus den vorhandenen Signalen in einfacher und anschaulicher Weise mehr relevante Informationen zu behalten.

5.2.1 Analyse Toleranzbandmethode

5.2.1.1 Referenzbildung

Referenzen sind Gut-Schweißungen von originalen Schweißgruppen in der originalen Fertigungsanlage mit den originalen Prozessparametern. Beim Schweißen der Referenzen werden die Signale der Prozesssensoren aufgezeichnet und um die dann vorhandene Kurvenschar das Toleranzband als Mittelwert, oberer und unterer Grenzwert berechnet. Die Anzahl der durchzuführenden Schweißungen ist von der Anwendung abhängig und kann zwischen einigen 10 und einigen hundert liegen, erforderlich sind mindestens zwei. Sind genügend referenzfähige Kurven vorhanden, werden diese als Referenzen markiert, die Parameter Jitter und einer $\pm\%$ -Toleranzschwelle (der Signalpegelwerte in V) festgelegt (Abbildung 4-1, Seite 32) und somit durch das System die Toleranzbänder generiert.

Ab diesem Punkt kann die interne Fehlerauswertung eingerichtet und benutzt werden. Informativ wurde dies für einige Proben durchgeführt. Die Bewertungsergebnisse sind in 5.2.1.2 dargestellt.

Für die gewählte Materialkombination (Tabelle 5-2) wurden zunächst geeignete Schweißparameter ermittelt. Randbedingungen waren dabei iO-Nähte, d.h. Poren- und auswurffreie Nähte mit genügender Durchschweißung. Es wurde ein optimaler Spalt durch Spaltband eingestellt und der Laserfokus auf die Oberfläche festgelegt. Die Laserleistung wurde so gewählt, dass bei weiteren Versuchen auch eine Erhöhung möglich wird.

Laserbearbeitungskopf (Optik)	Precitec YW50
Aufspannung	Wannenlage
Oberes Blech	DC06 ZE 50/50 BPO 0,75 mm
Unteres Blech	DX 53 D Z140 MB 1,5 mm
V _{Schweiß}	60 mm/s
P _{Laser}	4000 W
Spalt	0,2 mm

Tabelle 5-2 Parameter und Material bei der Referenzbildung

Alle Nähte sind optisch einwandfrei mit lediglich unerheblichen Endkratern. Bei der Erstellung der Referenz wurde der Parameter Jitter auf 10 gesetzt. Die Toleranzschwellen für die oberen und unteren Referenzen der 4 aufzuzeichnenden Parameter (Rückreflex, Temperatur, Plasma, Laser) wurden mit $\pm 10\%$ festgelegt. Diese Werte beruhen auf Erfahrungen des Systemanbieters.

In der Abbildung 5-10 sind die 4 Signale (von oben nach unten Laser, Rückreflex, Temperatur, Plasma) einer Referenzschweißung, jeweils innerhalb der gebildeten Toleranzschläuche eingetragen. Bereits bei dieser mit Laborsorgfalt verarbeiteten und reproduzierten Probe sind deutlich un stetige Differenzen vorhanden. Diese sind jedoch in den fertig erstarrten Schweißnähten nicht äußerlich sichtbar, was darauf hindeutet, dass das Ereignis, welches die Signaländerung verursachte, nicht zu signifikanten bleibenden Nahtmerkmalen führte.

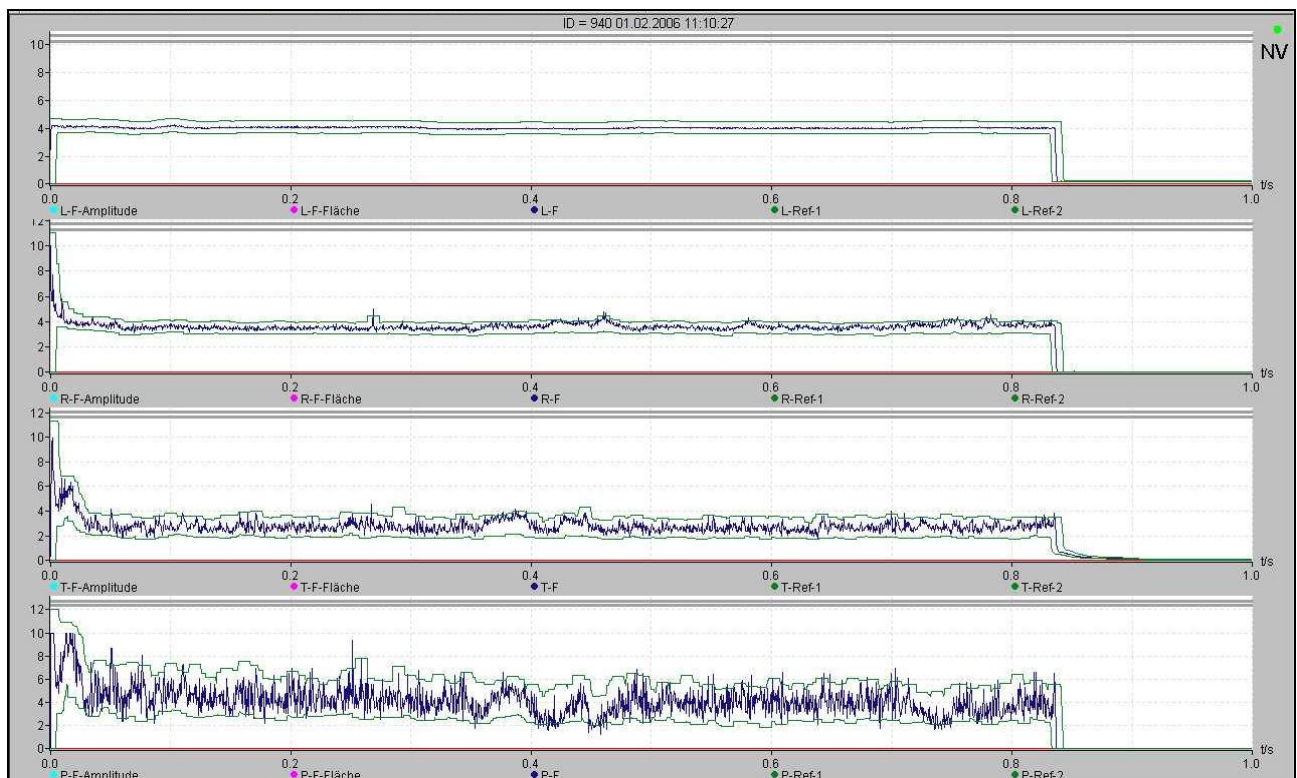


Abbildung 5-10 Signalpegel einer Referenzschweißung in Toleranzschläuchen v. o. n. u. Laser (L-F), Rückreflex (R-F), Temperatur (T-F), Plasma (P-F)

5.2.1.2 Erst-Testschweißungen

Mit den Erst-Testschweißungen wurden die angelernten Referenz-Toleranzbänder überprüft. Die Auswirkungen auf die Signalpegel durch die Fehlerquellen zu kleiner Spalt und zu großem Spalt in Relation zur optimalen Einstellung wurden erprobt. In Tabelle 5-3 erfolgt eine verbale Bewertung der Nahtqualitäten und in Abbildung 5-11 eine Voranalyse der Pegelhöhen.

niO-Test (0-Spalt)	Die Nähte hatten erwartungsgemäß viele Auswürfe und Poren.
iO-Test (0,2-Spalt)	Die Nähte sind optisch sehr gut, lediglich den Referenzen ähnliche Endkrater sind vorhanden.
niO-Test (0,4-Spalt)	Die Nähte wirken optisch gut, die Endkrater sind minimal, Ein gewisser Einfall der Oberraupe und ein Wurzelrückfall sind zu verzeichnen. Bei einer Probe ist ein stärkerer Einfall der Oberraupe vorhanden.

Tabelle 5-3 Kurzbewertung der Proben der Erst-Testschweißungen

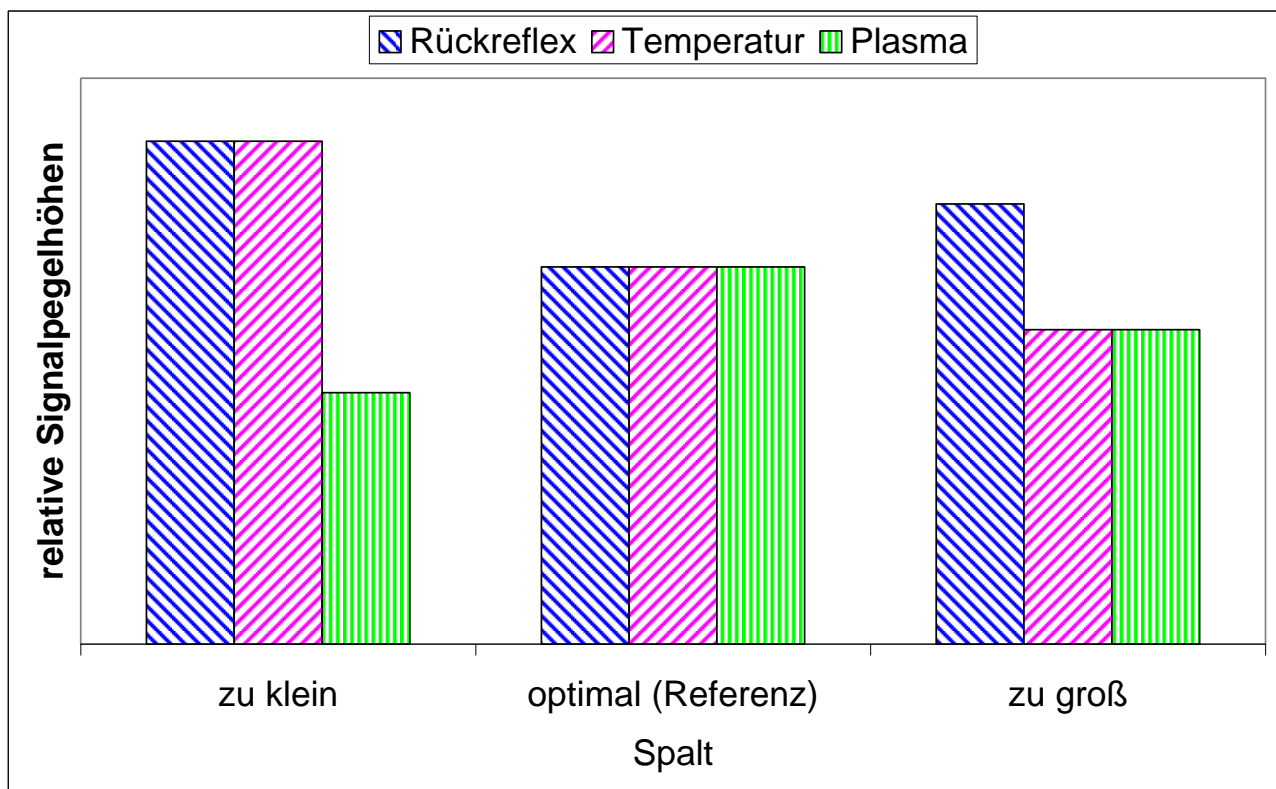


Abbildung 5-11 Qualitativer Vergleich der Signalpegelhöhen der Erst-Testschweißungen

Diese Stichversuchsbeispiele belegen in diesem Stadium lediglich, dass die Signalpegelwerte bei verschiedenen Prozesszuständen verschieden ausfallen können. Die Ergebnisse haben keine statistische Sicherheit. Die Versuche zeigten auch, wie diffizil die Signalwerte bei vermeintlich konstanten Laborbedingungen reagieren. Die eindeutige Abhängigkeit von einzelnen Prozessparametern ist ebenso nicht belegt wie die Ursachenzuordnung zu konkreten Ereignissen in der Nahtschmelze möglich ist. Weitere systematische Untersuchungen sind notwendig.

5.2.2 Statistische Analyse von Einflussgrößen

Zur Bestimmung von Parameterfenstern und besonders zur Ermittlung der Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale beim Erreichen der Grenzbereiche wurden Schweißreihen mit I-Naht am Überlapstoß in den

Arbeitspositionen¹

bei Variation der

- Wannenlage,
- vertikal steigend,
- horizontal-horizontal
- Fokuslage,
- Laserleistung,
- Schweißgeschwindigkeit,
- Winkelstellung (in Wannenlage)

durchgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Zuordnung zu iO-Bereichen, auftretenden Unregelmäßigkeiten und die Inprozess (RTPL) Signalpegel. Die ursprüngliche Einrichtung erfolgte in Wannenlage bei 3000 W Laserleistung am Werkstück und 60 mm/s Schweißgeschwindigkeit. Dabei wurde ein hinreichend großer iO-Bereich mit genügender Durchschweißung ermittelt. Zum Vergleich mit der teilweise geforderten stärkeren Durchschweißung wurde der Parameter Laserleistung bei einigen Versuchsreihen auf 3500 W erhöht.

Die Mittelwerte der aufgenommenen Signalpegel bei jeweils konstant eingestelltem Schweißspalt für drei ausgewählte Positions-Parametersätze (Schweißlagen) verdeutlichen Abbildung 5-13, Abbildung 5-14, Abbildung 5-15. Die Spalte wurden mittels Spaltband von 0 bis 0,5 mm in 0,05 mm Schritten jeweils für die gesamte Probe konstant eingestellt (Abbildung 5-12). Für jeden Spaltwert wurden 5 Nähte mit unveränderten Einstellungen geschweißt. Die Überschwüngen am Einschaltvorgang am Nahtanfang und die Signalabschnitte vom Ausschalten am Nahtende wurden vor der Mittelwertbildung entfernt. Die von diesen Rohdaten berechneten Standardabweichungen sind als Fehlerindikatoren in den Kurven mit angetragen.

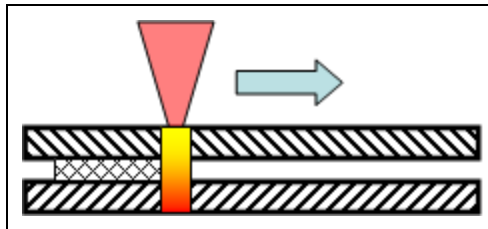


Abbildung 5-12 Konstantspalt

Die GRÜN-GELB-ROT farbige Qualitätsbewertung steht für die Zuordnung für in Ordnung (iO), bedingt in Ordnung (biO) und nicht in Ordnung (niO) der mit diesen Prozesseinstellungen typischerweise zu erzielenden Schweißnähte. Die Signalpegel zeigen in den 3 Fällen gleichartige Verlaufsformen jedoch auch doppeldeutige Wiederholungen ihrer Absolutwerte bei mehreren Spaltwerten. Bemerkenswert ist zudem der annähernd linear fallende Verlauf im Bereich von 1 bis 3 Zehnteln Millimeter Spalt. Die iO-Bereiche sind relativ wenig abhängig von den Variationen der Parameter, insbesondere innerhalb der typischerweise auftretenden Schwankungsbreiten. Somit werden diese Abweichungen der Prozessparameter für die Schweißergebnisse als unkritisch eingestuft.

¹ verwendete Bezeichnungen der Arbeitspositionen

hier	DIN EN ISO 6947 [124]
Wannenlage	PA
vertikal steigend	PF
horizontal-horizontal	PC

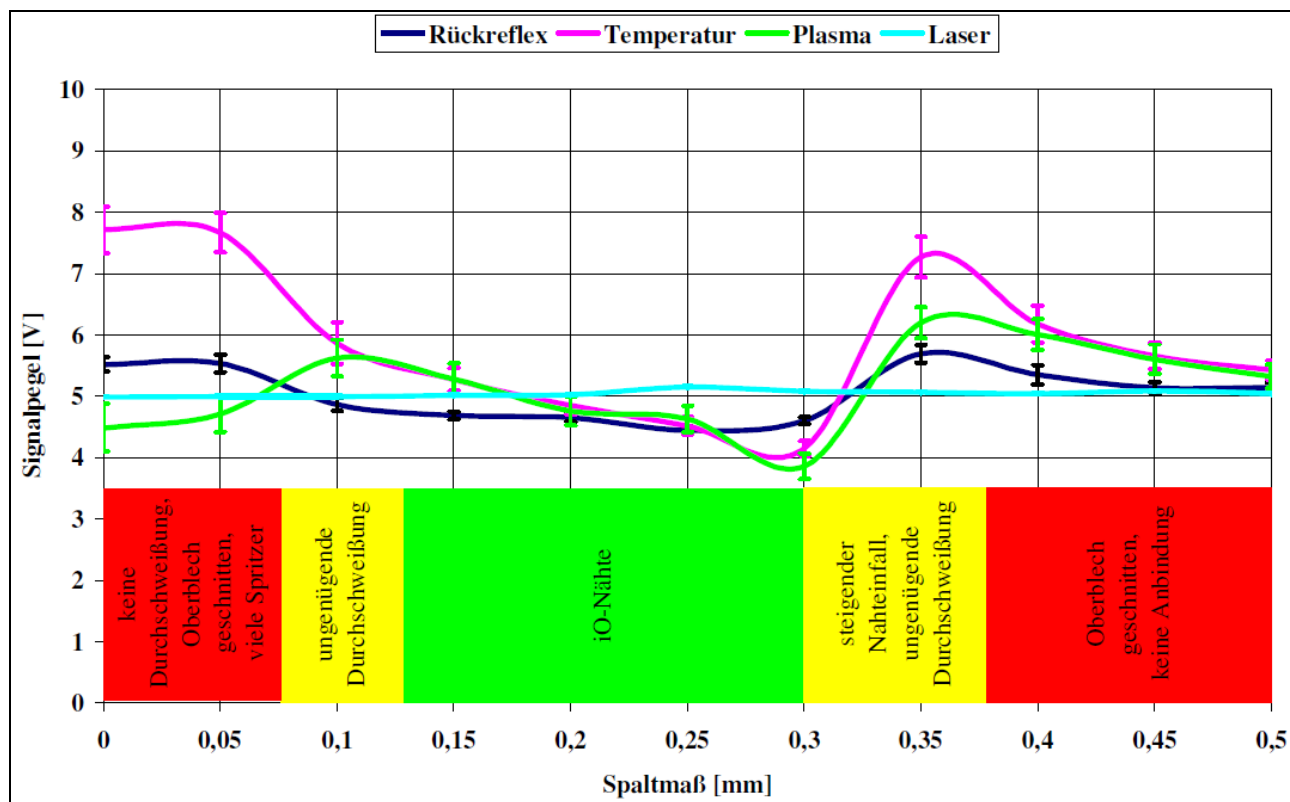


Abbildung 5-13 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom Spalt; Wannenlage, 3000 W, 60 mm/s

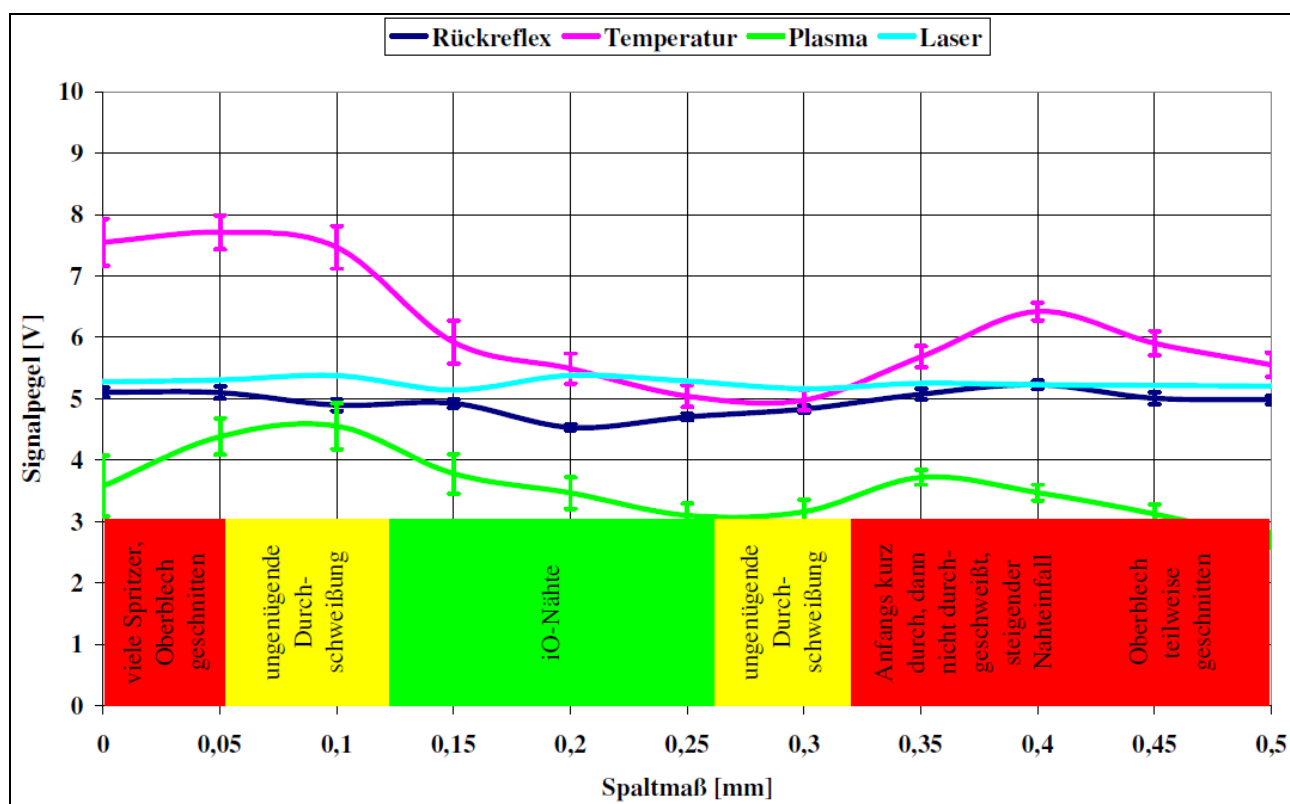


Abbildung 5-14 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom Spalt; vertikal steigend, 3000 W, 60 mm/s

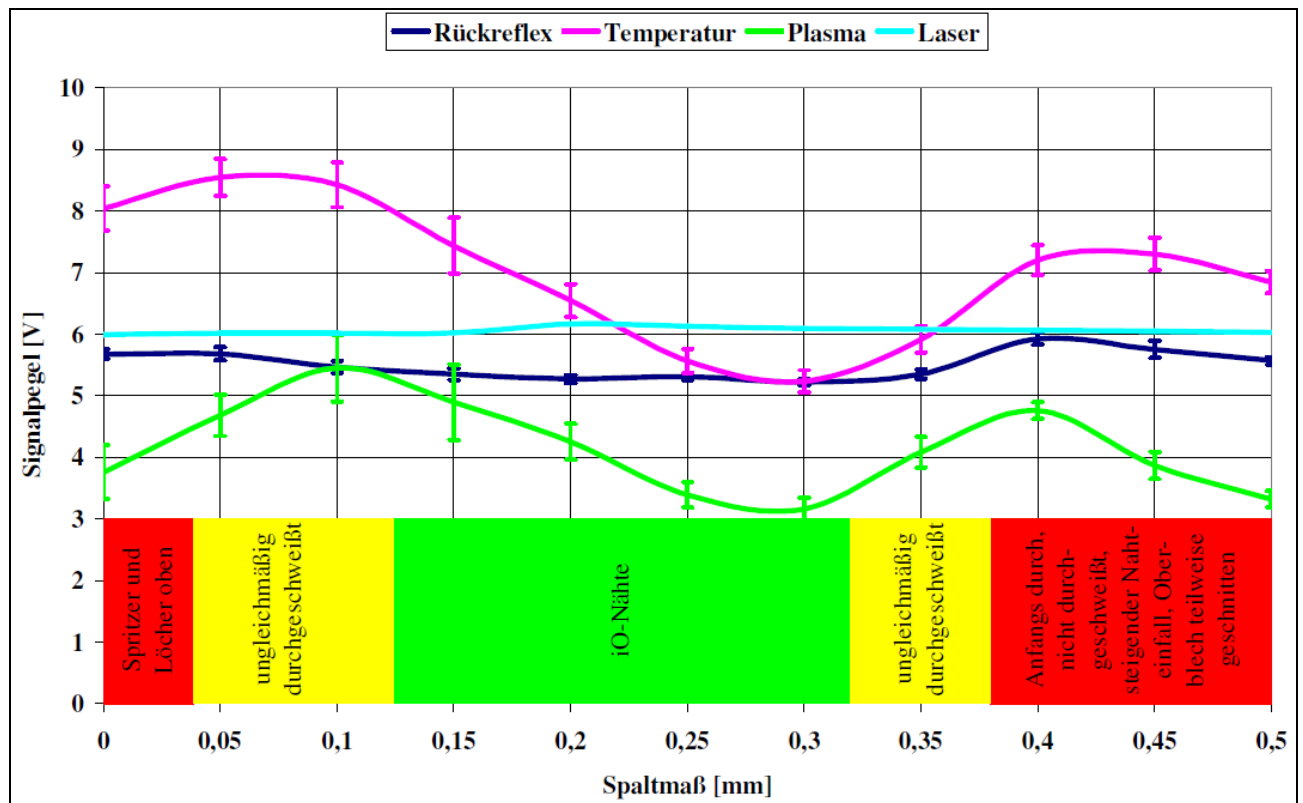


Abbildung 5-15 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom Spalt; vertikal steigend, 3500 W, 60 mm/s

In Abbildung 5-16, Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 ist der Einfluss der abweichenden Fokusslage auf die empfangenen Photoempfängersignale aufgezeigt. Die Fokusslage wurde von -5 mm (unter der Oberfläche), über 0 mm (auf der Oberfläche) bis +5 mm (über der Oberfläche) millimeterweise variiert. Je Messpunkt wurden 5 Nähte mit unveränderten Parametern geschweißt und die erfassten Werte ohne Nahtanfang und Ende gemittelt.

Erwartungsgemäß wirkt sich die Änderung der Fokusslage entscheidend auf die entstehenden Nahteigenschaften aus, was unmittelbar mit der Strahlqualität, dem minimalen Fokussdurchmesser (600 µm) und der geringen Schärfentiefe des verwendeten lampengepumpten Stablaser begründbar ist. Erstaunlich ist jedoch der deutliche Auswirkungsunterschied zwischen der Wannenlage und der Position vertikal steigend. Bei dieser ist trotz sonst gleichen Parametern der sichere Bereich wesentlich kleiner. Sichere Prozessfenster scheinen jedoch mit Leistungsüberschuss wahrscheinlicher zu werden. Die Inprozess Messung der Fokusslage bzw. des Arbeitsabstandes und die Einbeziehung in die Prozessüberwachung ist demnach anzustreben.

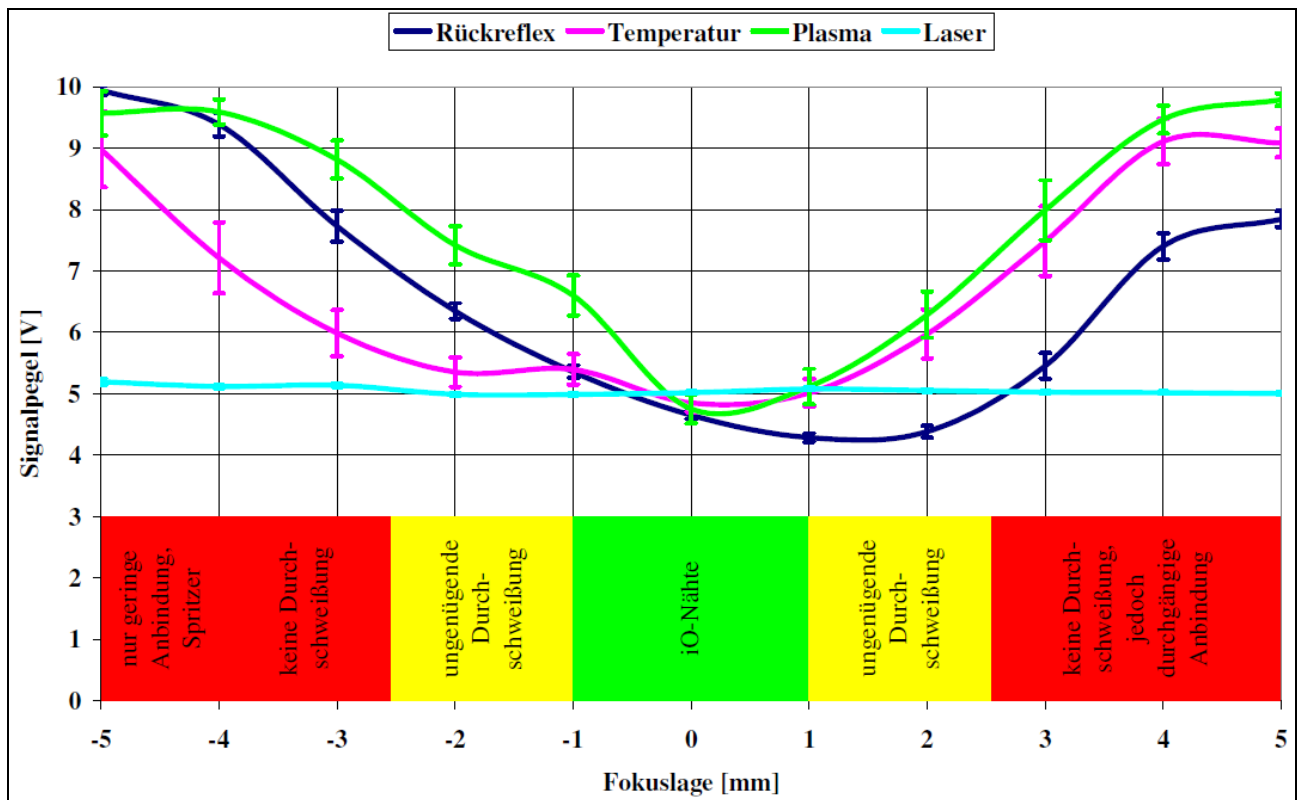


Abbildung 5-16 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom der Fokusslage; Wannenlage, 3000 W, 60 mm/s

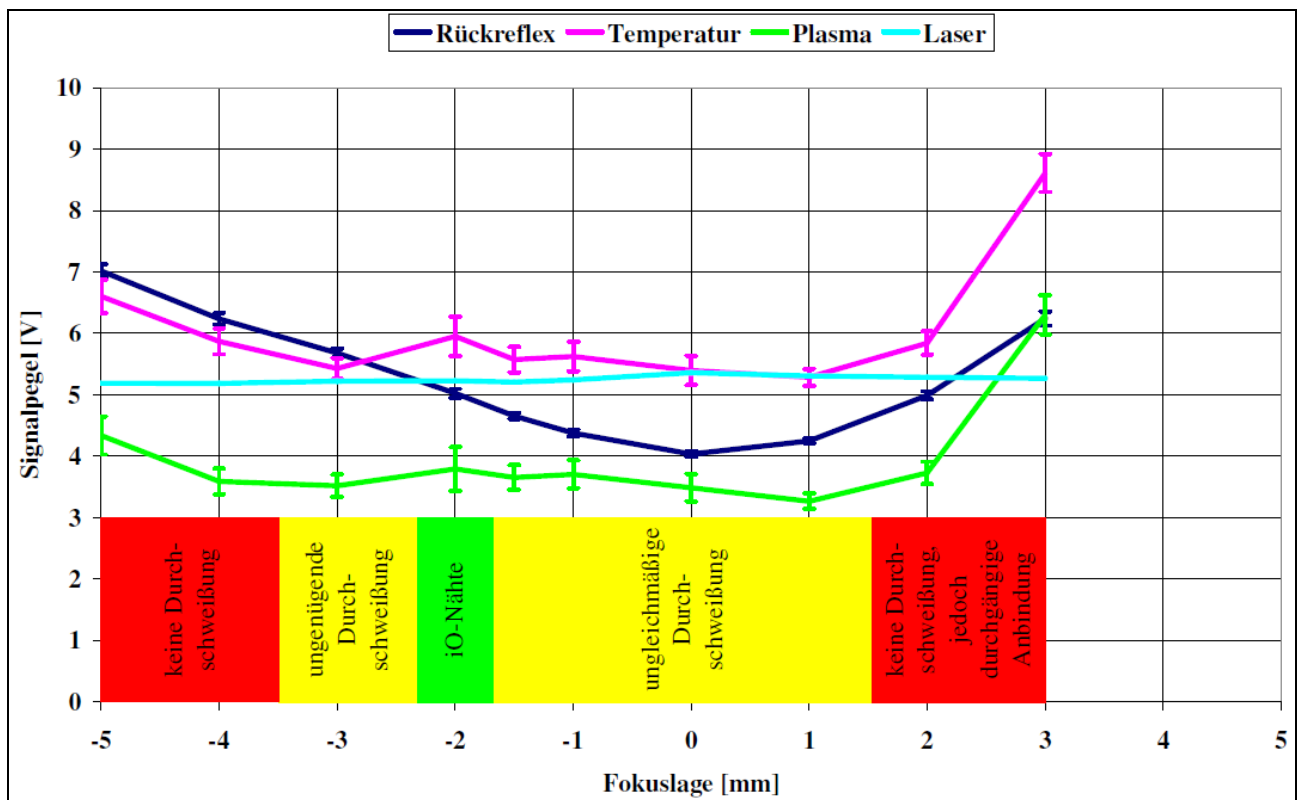


Abbildung 5-17 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Fokusslage; vertikal steigend, 3000 W, 60 mm/s

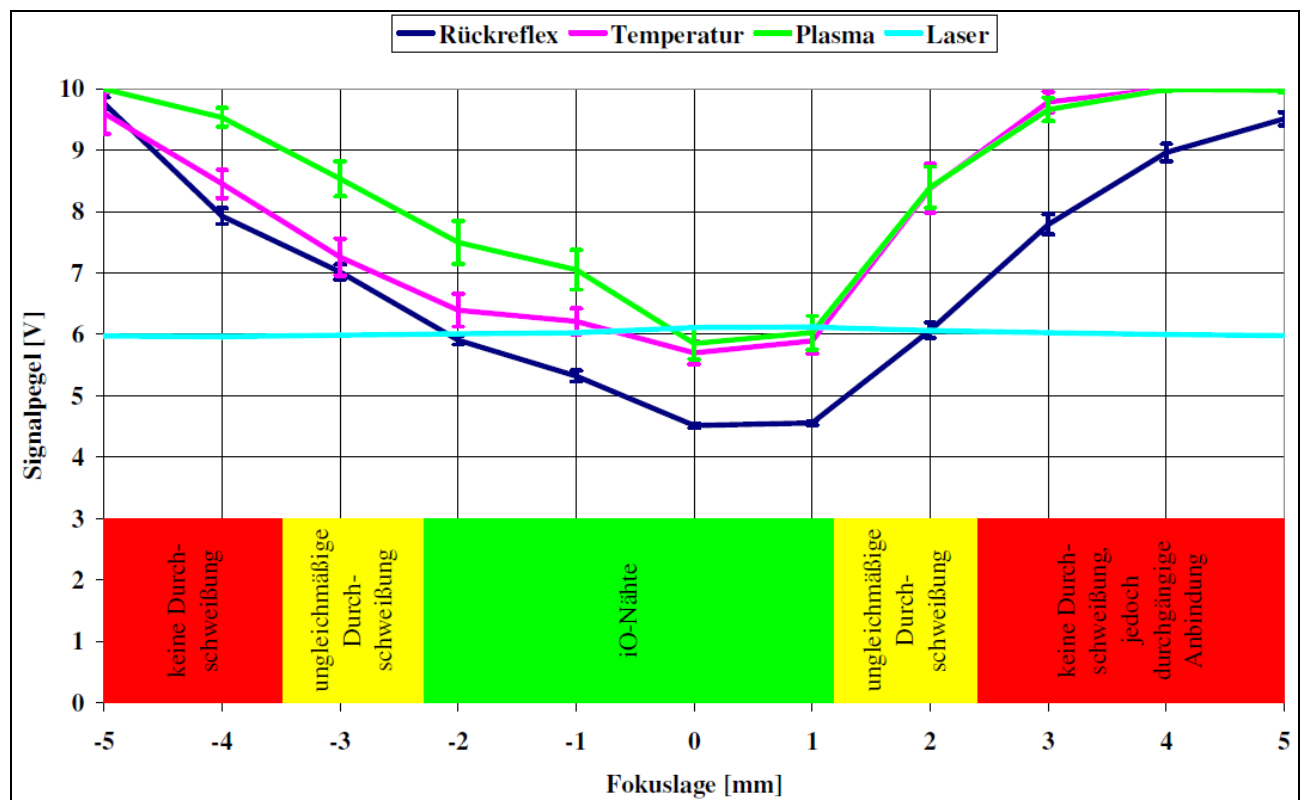


Abbildung 5-18 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Fokusslage; horizontal-horizontal, 3500 W, 60 mm/s

Die Diagramme in Abbildung 5-19, Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21 unterstreichen die Forderungen nach konstanten Prozessparametern und exakter Roboter-Bahnprogrammierung bzw. exakter Bahngenauigkeit. Die Laserleistung darf von der Laserquelle, über die Strahlführung und Strahlformung nicht beeinflusst werden. Leistungsverluste durch unsaubere Optiken, thermische bedingte Fokusverschiebungen und unsaubere Schutzgläser müssen vermieden werden. Die Schutzgläser sollten überwacht werden und regelmäßig muss die austretende Laserleistung nach der Optik gemessen werden.

Die Schweißgeschwindigkeit meint in den meisten Karosseriebau-Anwendungsfällen die robotergeführte Verfahrensgeschwindigkeit des Laserfokus auf der Werkstückoberfläche. Die 6 oder 7 vorhandenen Roboterachsen, deren Umorientierungen und komplexes Zusammenspiel erfordern zumindest in der Einricht- und Programmierphase die Überprüfung der in Serientaktzeit realisierten Schweißgeschwindigkeiten. Eine komfortable, kamerabasierte Messmethode für die Schweißgeschwindigkeit ist in [45] realisiert und vorgestellt. Beim Einrichten von geraden Liniennähten kann die Gleichförmigkeit der Roboterbewegung auch mit Beschleunigungsaufnehmern überprüft werden.

Die Abweichung von der orthogonalen Strahlrichtung auf die Wirkstellenoberfläche als seitliche Winkelstellung verursacht in der praktischen Anwendung, d. h. in den meist nach Augenmaß geteachten Roboterprogrammen, keine Qualitätsminderung. Dennoch sind Abhängigkeiten der Signalpegel vorhanden und die Winkelstellung sollte innerhalb einer Naht nicht variieren.

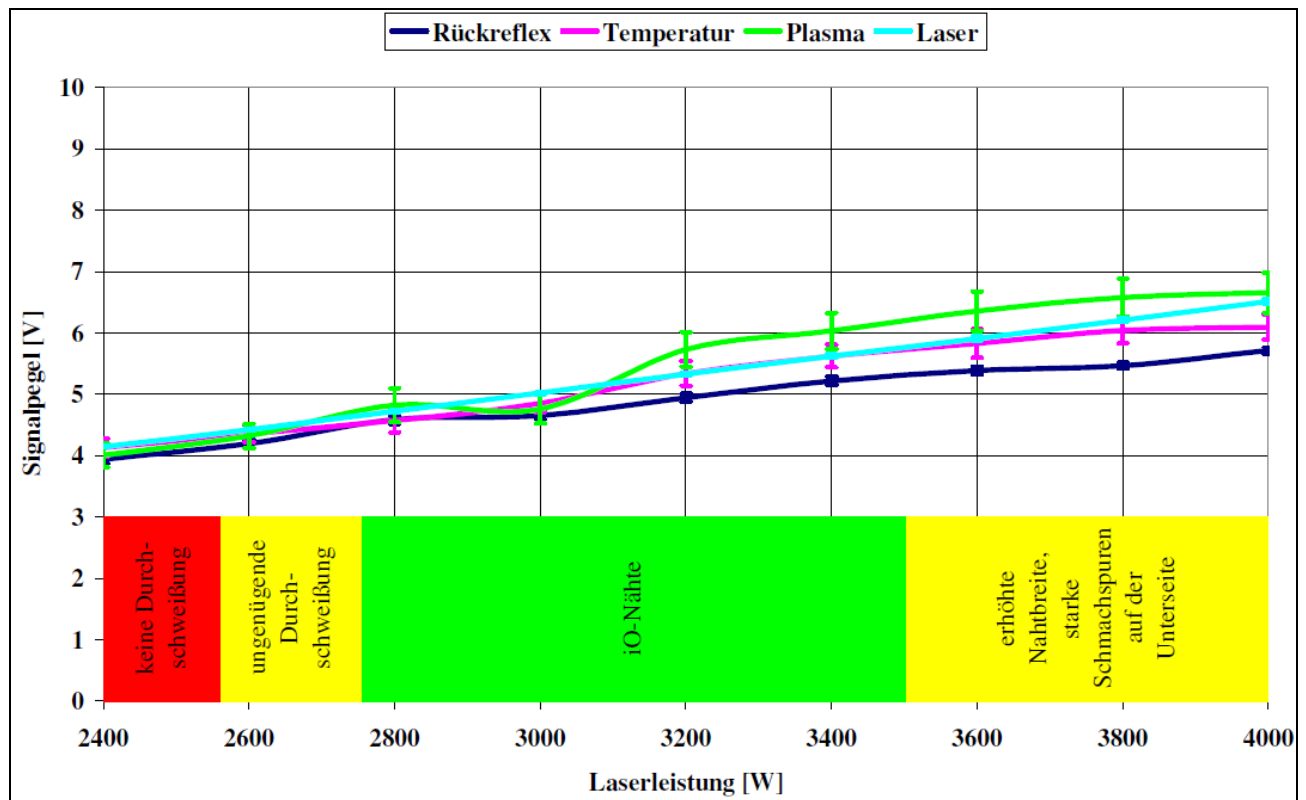


Abbildung 5-19 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Laserleistung; Wannenlage

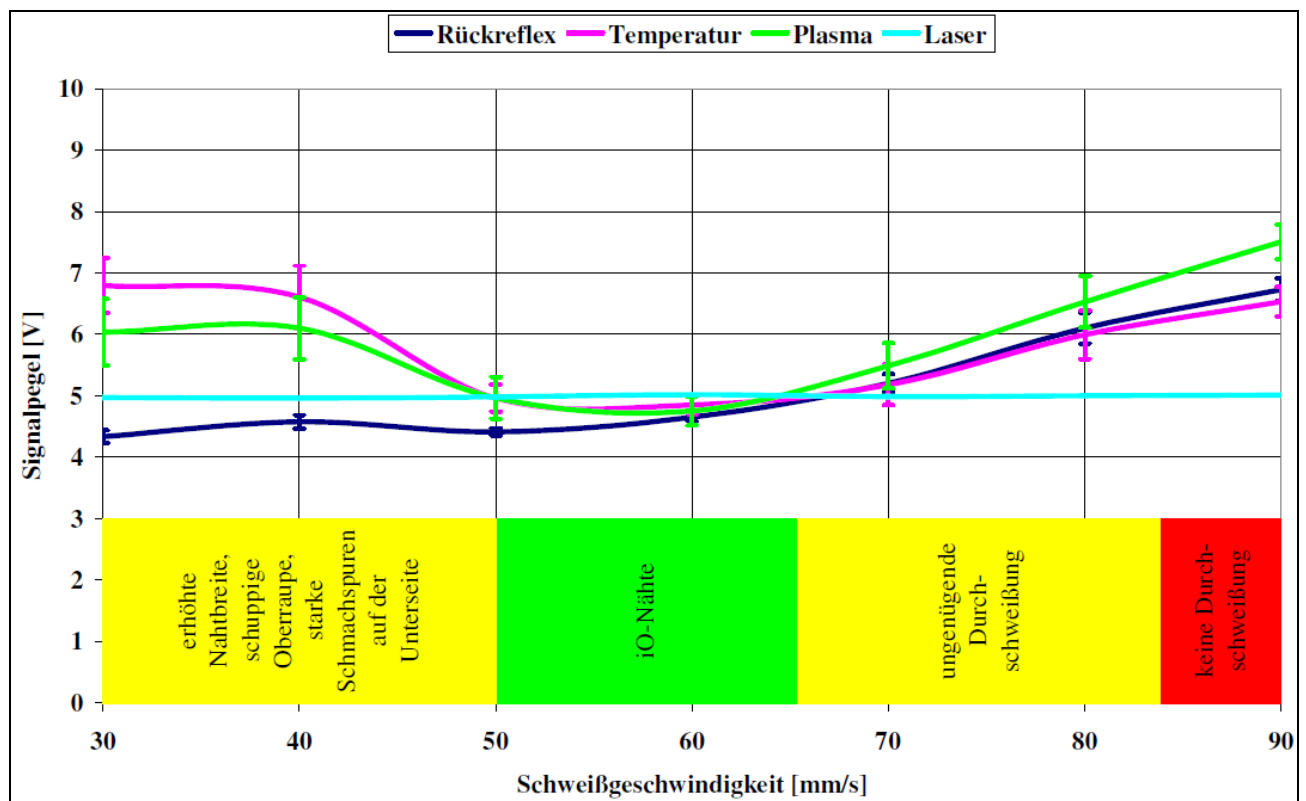


Abbildung 5-20 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit; Wannenlage

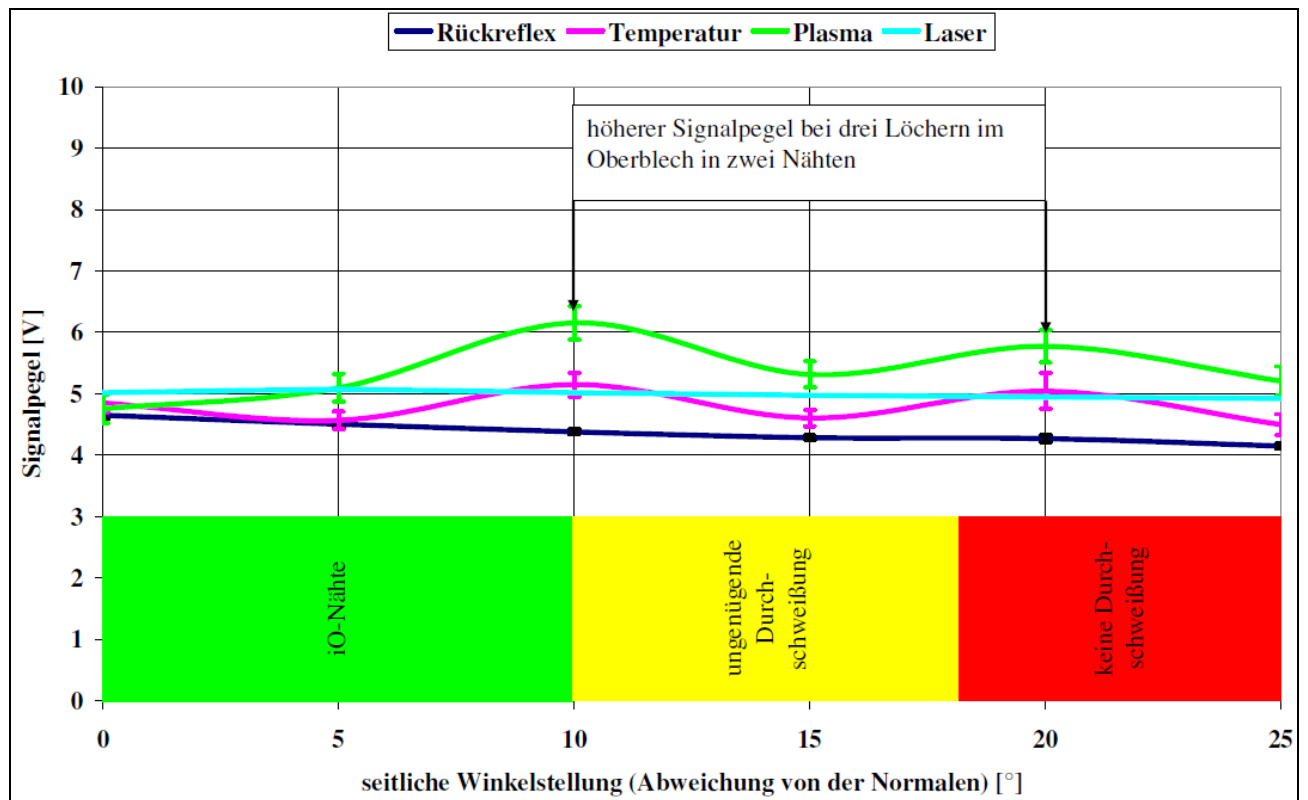


Abbildung 5-21 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der seitlichen Winkelstellung; Wannenlage

5.2.3 Einzelanalyse der Einflussgröße Spalt

Mit den im Folgenden dargestellten Schweißnähten werden die Fertigungsrealität und gleichzeitig die Zusammenhänge zwischen Spaltmaß, erreichten Nahtmerkmalen und aufgenommenen RTPL- Pegeln abgebildet. Die Laserleistung bzw. Streckenenergie wurde so eingestellt, um im iO-Fall die im Karosseriebau geforderte deutliche Wurzel­ausprägung zu erreichen. Tabelle 5-4 enthält die Parametersätze für die ausgewählten Musterschweißungen.

Blech oben	DC06 ZE 50/50 BPO; 0,75 mm dick
Blech unten	DX 53 D Z140MB; 1,5 mm dick
Nahtlänge	50 mm
Schweißlage	vertikal steigend
Laserleistung	3500 W
Schweißgeschwindigkeit	60 mm/s
Fokuslage	0
LWM Abtastrate	2000 Hz
LWM Signalfilter	50 Hz Tiefpass
Spalt bei ID 1649	0,2 mm
Spalt bei ID 1658	0 mm
Spalt bei ID 1648	0 bis 0,8 mm

Tabelle 5-4 Parametersätze der Proben

Abbildung 5-22 zeigt die Signalpegel einer iO-Naht sowie deren Oberraupe- und Wurzelansicht. Die Oberraupe ist glatt und frei von Spritzern, die Signalpegel zeigen keine Auffälligkeiten. Das Blech um die Nahtwurzel ist von Schmauchspuren geprägt, die dunkleren Linien stammen von Materialauswürfen, es sind jedoch keine Krater, Löcher, Poren oder ein ausgeprägter Wurzelrückfall vorhanden. Die Schmauchspuren treten bei geringer (gerade so) Durchschweißung nicht auf. Die Gleichmäßigkeit der Nahtoberraupe zeigt sich nicht im Plasma-Signal und nur bedingt im Temperatur-Signalpegel. Für die Rückreflexion ist über der Nahtlänge eine leichte linear abfallende Tendenz zu erkennen.

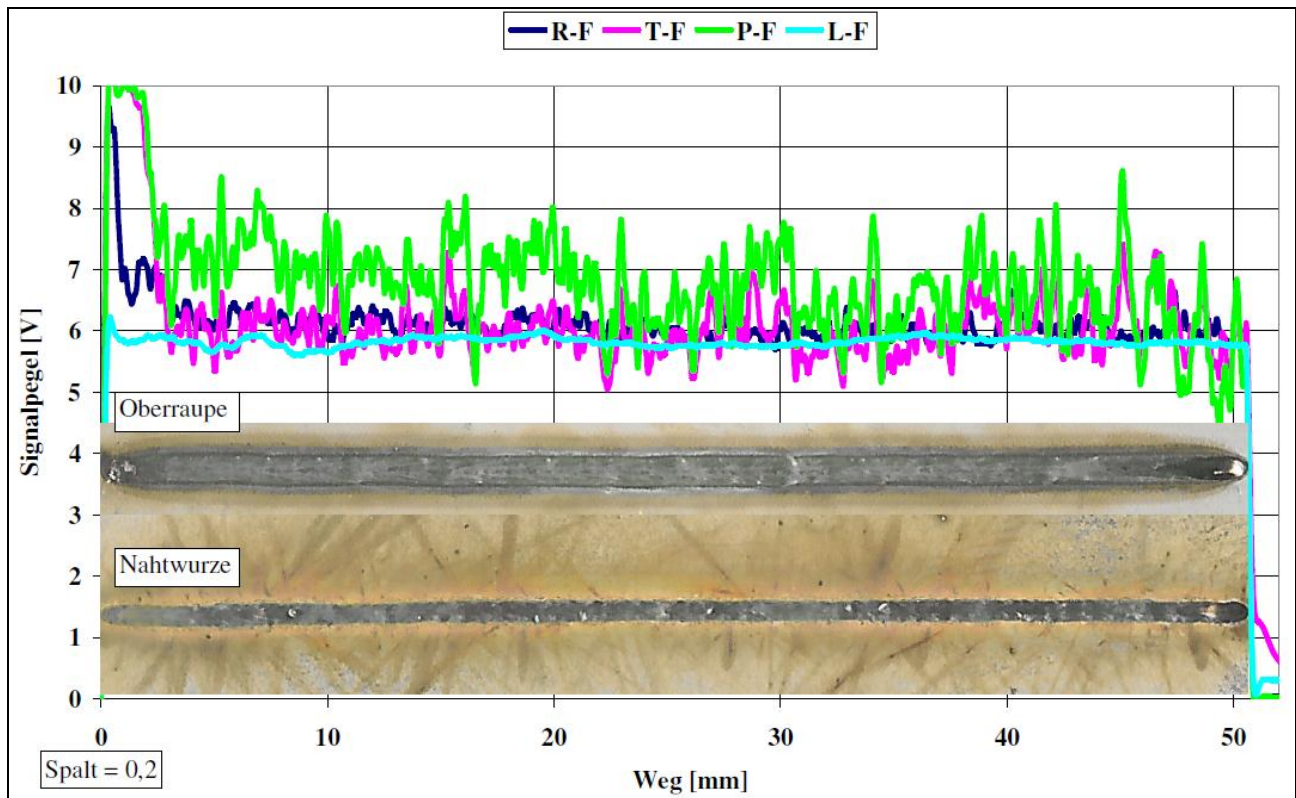


Abbildung 5-22 iO-Naht Signalpegel - 0,2-Spalt

Abbildung 5-23 zeigt das Ergebnis einer 0-Spaltschweißung. Bei gleicher Leistung und Geschwindigkeit ist diese nicht hinreichend durchgeschweißt und die Signalpegel sind noch unruhiger. Das Rückreflexsignal liegt auf gleichem Niveau wie bei der iO-Naht, das Temperatursignal liegt höher, vermutlich da mehr Energie im oberen Blech verbleibt. Die starken Schwankungen des Plasmasignals sind den entstandenen Nahtzuständen nicht eindeutig zuordenbar.

Für der Naht der Abbildung 5-24 wurde ein Keilspalt über die Gesamtlänge eingestellt. Im mittleren iO-Bereich sind die Signale im eingestellten Niveau und auch an der Unterseite des Bleches sind die beschriebenen Schmauchspuren vorhanden. Im letzten Drittel des Bleches liegen die Signale wiederum auf dem eingerichteten Niveau, es ist jedoch keine Anbindung vorhanden. Die Signalpegel können nicht als alleinige Bewertungsgrundlage herangezogen werden. Die gesamte Verlaufsform dieser Einzelnahtkurve gleicht den Kurvenverläufen der statistisch gemittelten Kurven aus Abbildung 5-13, Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15.

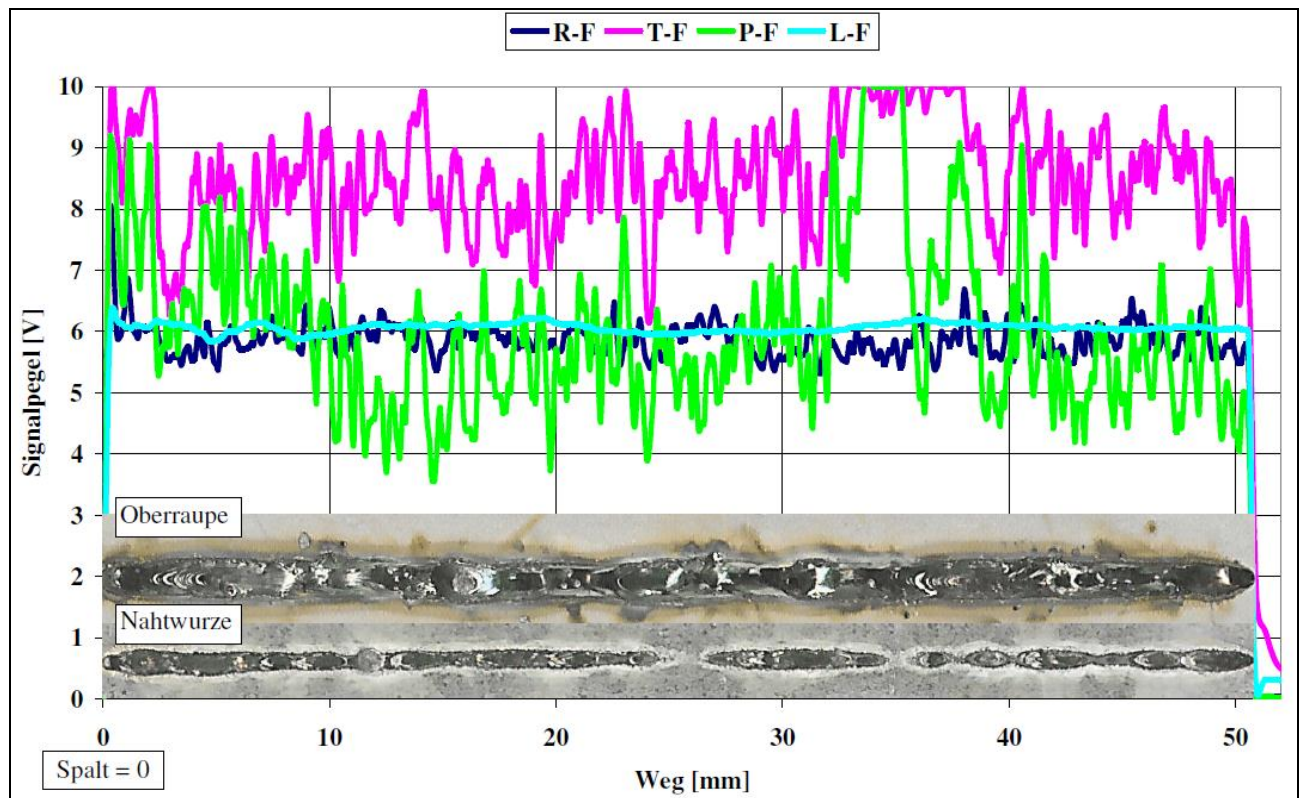


Abbildung 5-23 niO-Naht Signalpegel - 0-Spalt

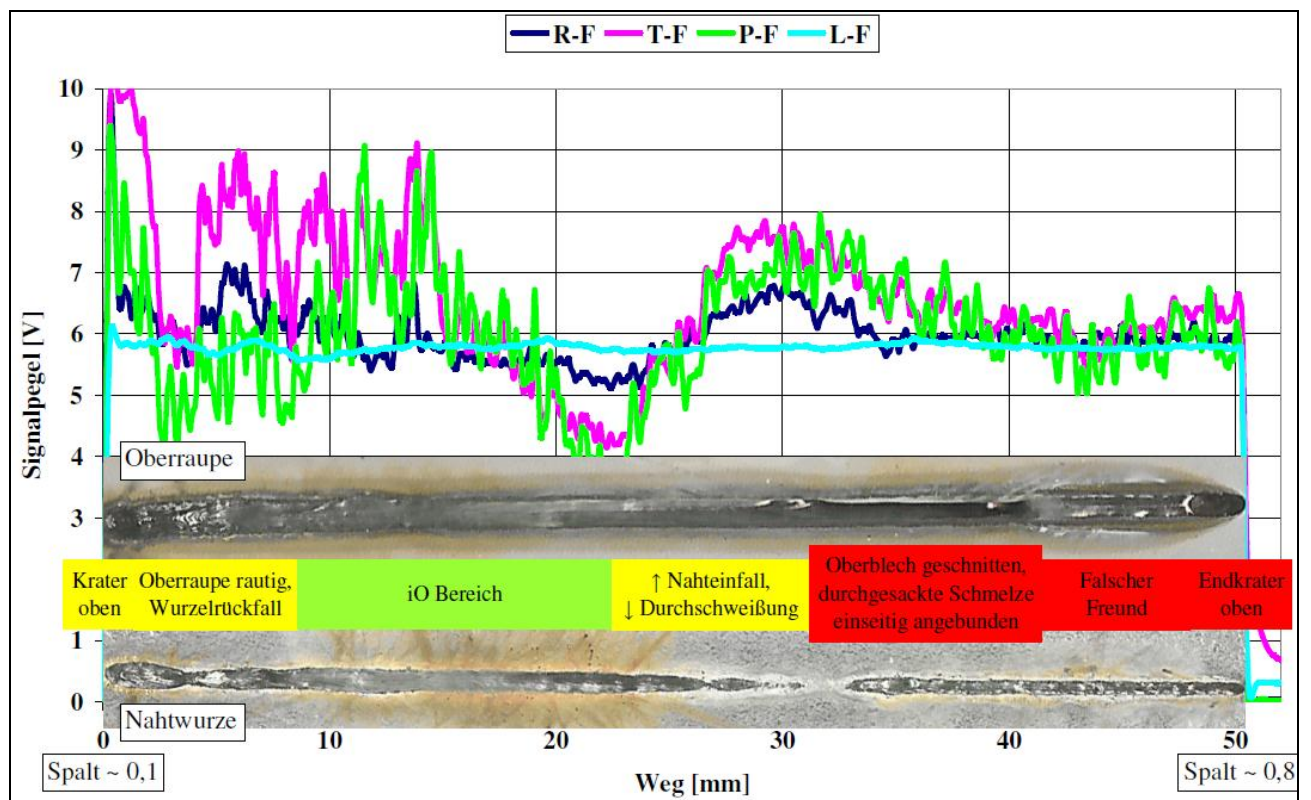


Abbildung 5-24 Signalpegel - Keilspalt 0,1 bis 0,8 mm

5.2.4 Spaltverträglichkeit dünner Strukturbleche

Bei dieser Testreihe wurden besonders dünne Strukturbleche auf die Spaltverträglichkeit hin untersucht. Diese Blechsorten werden bei den Karosserien eines PKW-Typs im Heckbereich (Abbildung 5-25) an den Teilen Seitenteil, Schließteil + Abschlussteil hinten verwendet. Die Versuche wurden mit Probeblechen aus Originalmaterial durchgeführt. Die Versuchsreihe wurde wie Abschnitt 5.2.2 statistisch abgesichert.

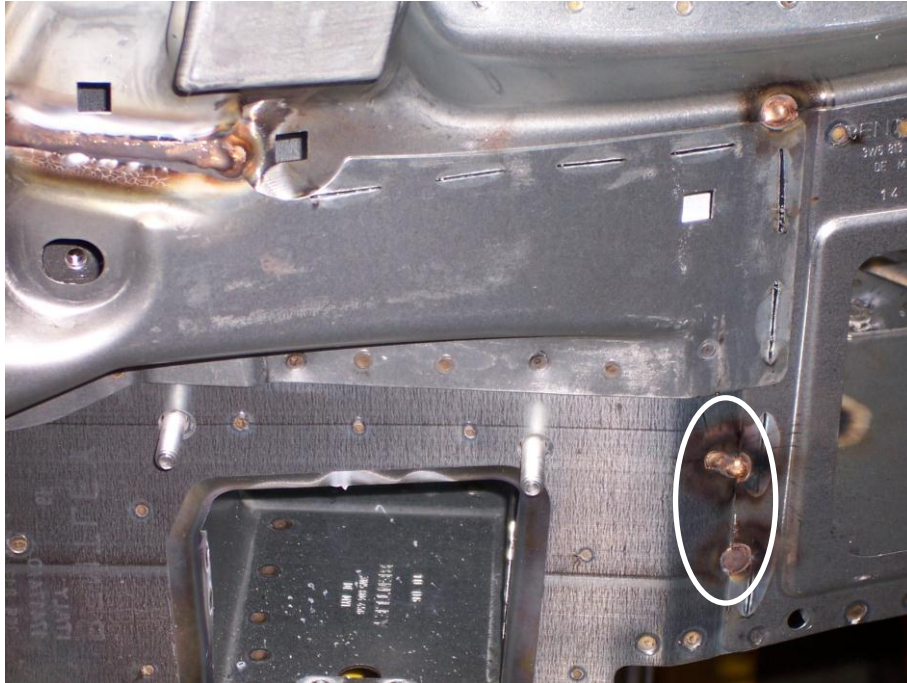


Abbildung 5-25 Lasernähte im PKW-Heckbereich (mit Nacharbeitslösung für niO-Nähte)

Blech oben	H220 PD Z100MB 0,7 mm
Blech unten	H220 PD Z100MB 0,7 mm
Nahtlänge	50 mm
Schweißlage	horizontal-horizontal
Laserleistung	2800 W
Schweißgeschwindigkeit	60 mm/s
Fokuslage	0
LWM Abtastrate	2000 Hz
LWM Signalfilter	50 Hz Tiefpass
Spaltvariation	0 bis 0,5 mm

Tabelle 5-5 Parametersatz für dünne Strukturbleche

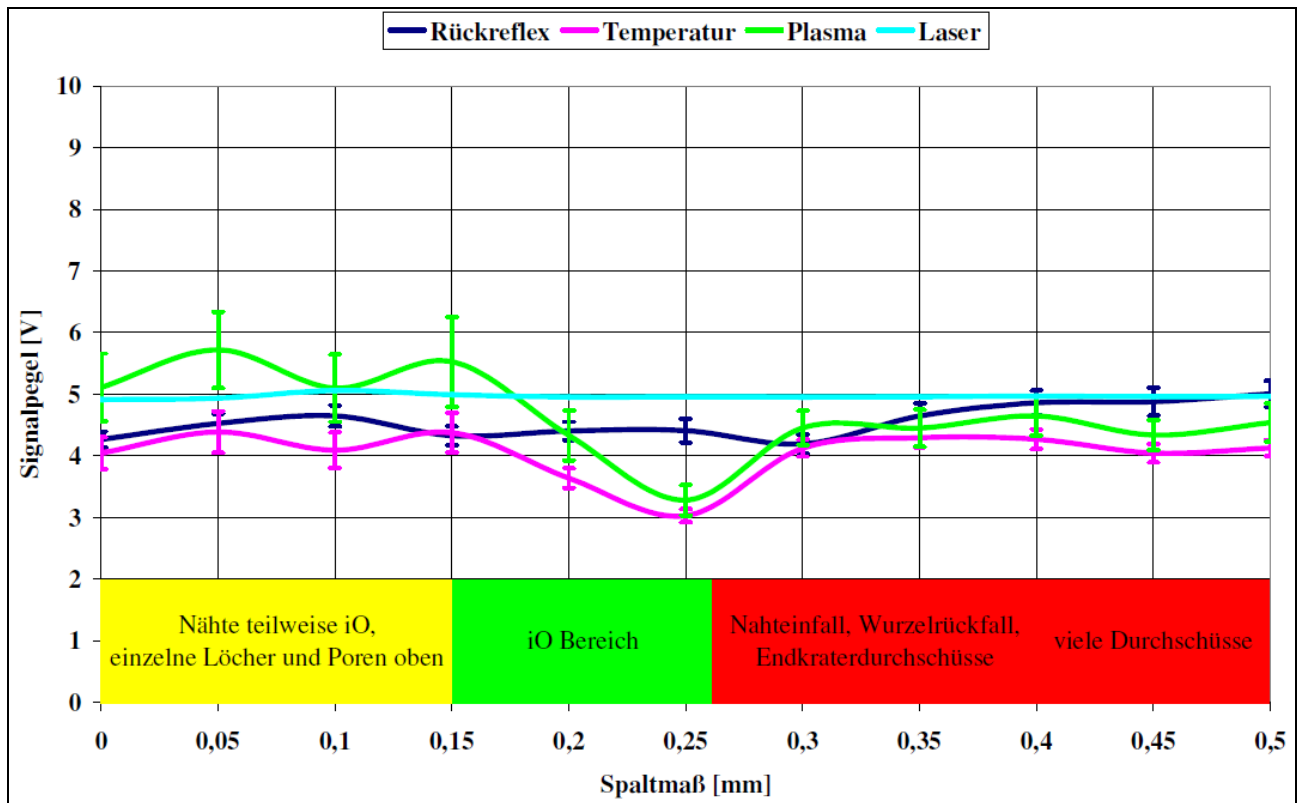


Abbildung 5-26 Mittelwerte der Signalpegel über dem Spalt für 2 x H220 PD Z100 MB 0,7 mm

Erstaunlicherweise wurden trotz der beiden feuerverzinkten Oberflächen (Z100) im Nullspaltversuch nicht die erwarteten Spritzer- und Auswurfmenen erzielt. Die Nähte sind als iO bewertbar. Vermutlich wird das relativ weiche und dünne Blech durch die thermisch induzierten Verformungen entgasungsgünstig beeinflusst. Auf diesen Effekt kann bei den dreidimensionalen Realteilen jedoch nicht gesetzt werden.

Bei 0,05 mm bis 0,15 mm entstanden vereinzelte Löcher und teilweise rautigere Nahtoberrauen. Der eigentliche iO Bereich ist kleiner als bei vorherigen anderen Materialien und schlägt dann direkt zu niO Nähten um. Hierfür kann die geringere Blechdicke als Ursache betrachtet werden. Der wenige Grundwerkstoff reicht nicht zur Schließung größerer Spalte aus, während der Spalt zur Ableitung des Zinkdampfes nicht verringert werden kann. Der fehlende Übergangsbereich drückt sich in den Signalpegeln durch deren nicht so deutliche Überhöhung aus. Dennoch gleicht der Signalpegelverlauf denen der Abbildung 5-13, Abbildung 5-14, Abbildung 5-15 und Abbildung 5-24.

5.2.5 Einführung der MILLIMETERPEGEL

Für die Qualitätssicherung in der Karosseriebau-Fertigungspraxis ist eine Nahtfehlerfindungsgröße < 1 mm nicht relevant. Eine mögliche Merkmalerkennung kann und sollte diskret jedem Nahtlängenmillimeterstück zuordenbar sein. Dies ermöglicht zudem die iO-, biO- und niO-Längenanteile merkmalsbezogen zueinander in Relation zu setzen. Beispielsweise, wenn eine Naht 10% der Länge eine bestimmte Unregelmäßigkeit haben darf und dennoch nicht nachgearbeitet werden muss.

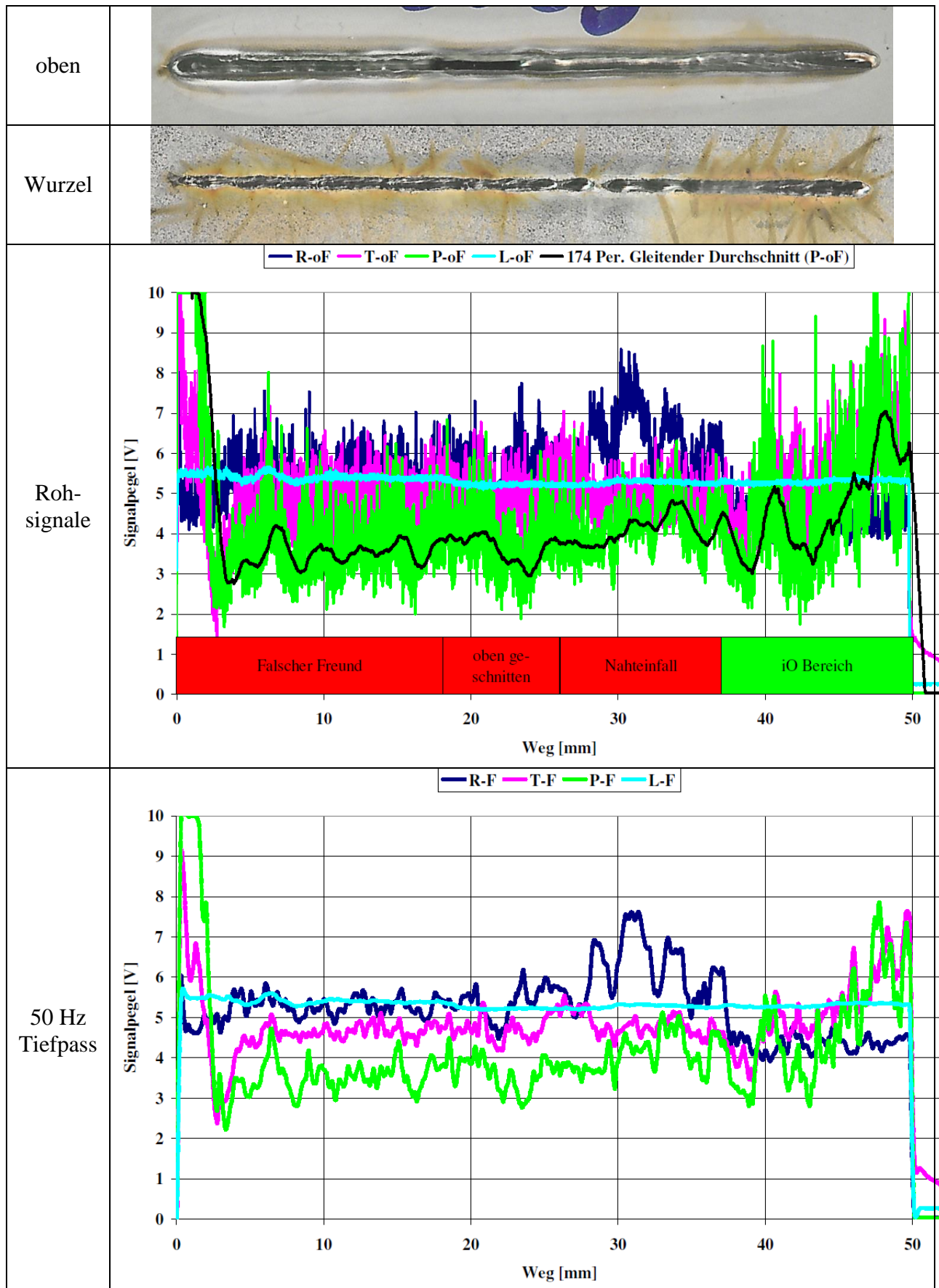
Für die statistische Absicherung sollten jedoch je Nahtmillimeter genügend Signalpegelmesswerte jeder Größe aufgezeichnet werden. Aus diesem Grund wird die Abtastrate der RTPS-Sensoren von den herstellerseitig empfohlenen 2000 Hz auf 10000 Hz angehoben. Die aufgezeichneten Signalpegel werden dann in Naht-mm-Schritten gemittelt und deren Standardabweichungen berechnet (MILLIMETERPEGEL). Bei einer Schweißgeschwindigkeit von 60 mm/s werden während jedem Nahtmillimeter für jeden Messwert 166 Werte erfasst, gemittelt und die Standardabweichung berechnet.

In Abbildung 5-27 sind für eine Beispielnah die Signalpegel als ungefilterte Rohsignale, 50 Hz Tiefpass gefilterte Signale, als mm-Mittelwerte und deren Standardabweichungen aufgetragen. Gegenüber den 50 Hz gefilterten und den ungefilterten Pegelkurven sind die MM-Pegel Diagramme sehr anschaulich. Die Informationen über die Prozessruhe oder Unruhe in den Standardabweichungen ergeben zusätzliche Trennmöglichkeiten für Nahtmerkmale. Die Datenmenge wird von 664 Einzelwerten (Rx166, Tx166, Px166, Lx166) zu 8 Einzelwerten (R-MM, R-STA, T-MM, T-STA, P-MM, P-STA, L-MM, L-STA) je Nahtlängenmillimeter und zu erfassender Signalquelle reduziert. Durch die mm-Normierung können komfortabel die Daten verschiedener Quellen und Abtastraten zusammengespielt werden.

Die Naht in Abbildung 5-27 wurde mit der Methode „Schrägfahrt am Keilspalt“ geschweißt, wodurch mehrere iO-niO-Bereiche in dieser Naht provoziert wurden. In den „Falschen Freund“- und „Oben geschnitten“-Abschnitten sind die Signale sehr gleichmäßig und augenscheinlich nicht unterscheidbar. Während des Nahteinfalls ist das Rückreflex-Signal auffällig hoch, gleichzeitig die Durchschweißung gering. Ob die erhöhten Rückreflexionen aus dem nach unten nicht geöffneten Keyhole oder durch die konkave Nahtoberraupe bedingt sind, ist hier nicht ersichtlich. Der iO Abschnitt am Ende gleicht dem Beginn kompletter iO-Proben.

Blech oben	DC06 ZE 50/50 BPO; 0,75 mm dick
Blech unten	DX 53 D Z140MB; 1,5 mm dick
Nahtlänge	50 mm
Schweißlage	horizontal-horizontal
Laserleistung	4000 W
Schweißgeschwindigkeit	60 mm/s
Fokusslage	0
LWM Abtastrate	10000 Hz
LWM Signalfilter	ungefiltert und 50 Hz Tiefpass
Videobildaufzeichnung	5650 fps
BK-Objektivblende	4 auf
ROI	48x64 Pixel ²
Belichtungszeit	0,05 ms
Spalt bei Naht 2089	0,8 bis 0 mm

Tabelle 5-6 Parametersatz für die Naht der Abbildung 5-27



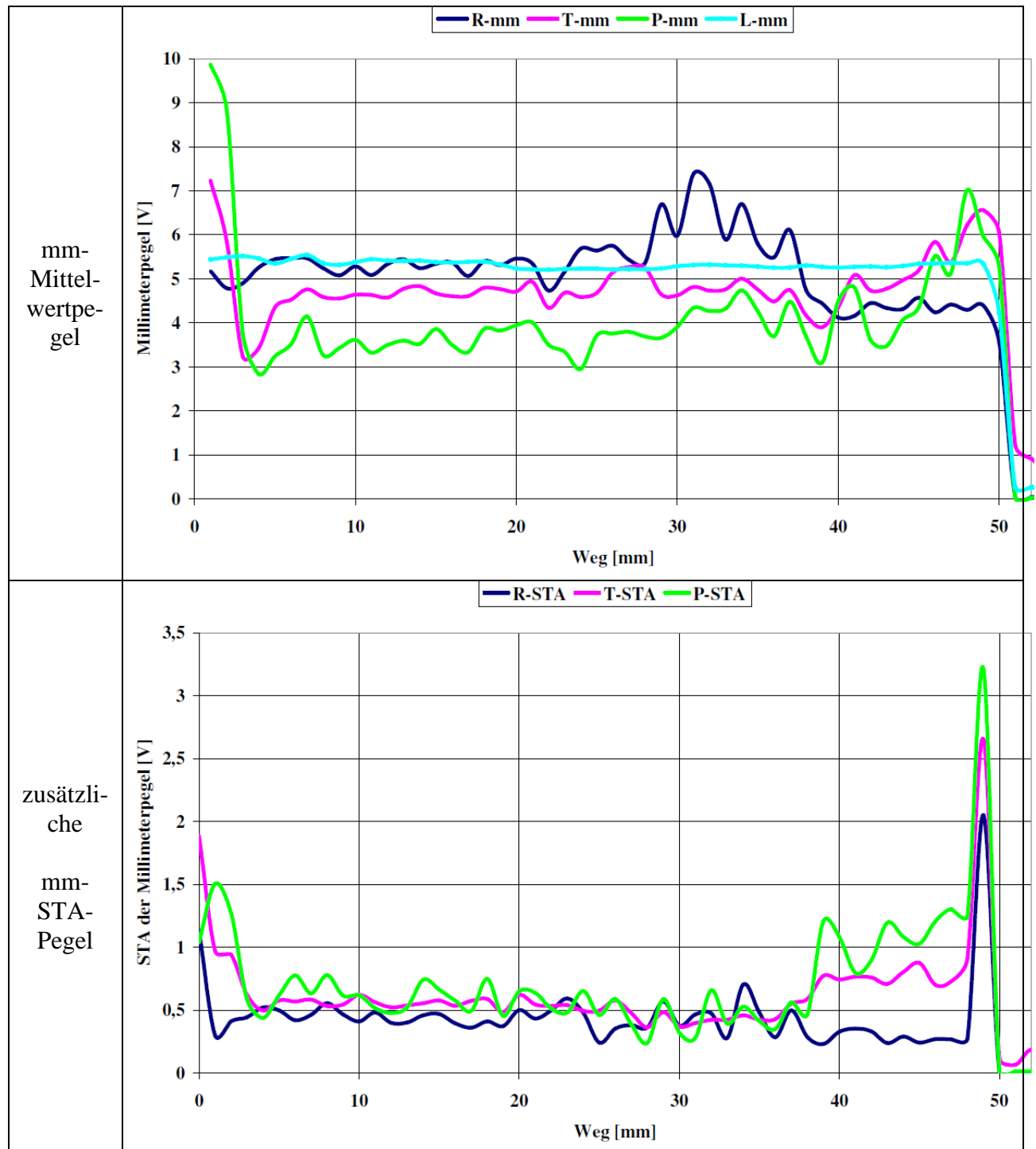


Abbildung 5-27 Bearbeitungsvarianten der Signalpegel

5.3 Inprozess Untersuchungen – Schwerpunkt Prozessbildbewertung

5.3.1 Analyse LWM-C

Die folgenden Untersuchungen und Analysen hatten die Aufgaben, detaillierte Aussagen über den Schweißprozess zu gewinnen und zusätzliche Signale auf ihre Aussageeignung und – sicherheit hin zu überprüfen.

Seitens des Herstellers wird ein um die kamerabasierte Prozessbeobachtung Hard- und Softwareseitig erweitertes System angeboten. Als Kamera dient eine Hersteller-Eigenentwicklung mit CMOS Sensor und elektronischer Verarbeitung, die eine Datenübertragung mittels Ethernetkabel ermöglicht. Diese Datenübertragung erlaubt wesentlich längere Übertragungsstrecken als die sonst verwendete Kamera mit 2 x 10 m Cameralink-Kabel. Somit empfiehlt sich diese Hardware für den Einsatz in Karosseriebauanlagen. Die Graustufenvideos wurden ohne Fremdbeleuchtung in Pixelgrößen von 128 x 128 Pixel² aufgenommen und mit 24 Bit Grauwerttiefe gespeichert. Die Grauwertanzahl der einzelnen Bilder liegt jedoch unter 256 (8 Bit). (Abbildung 5-28)

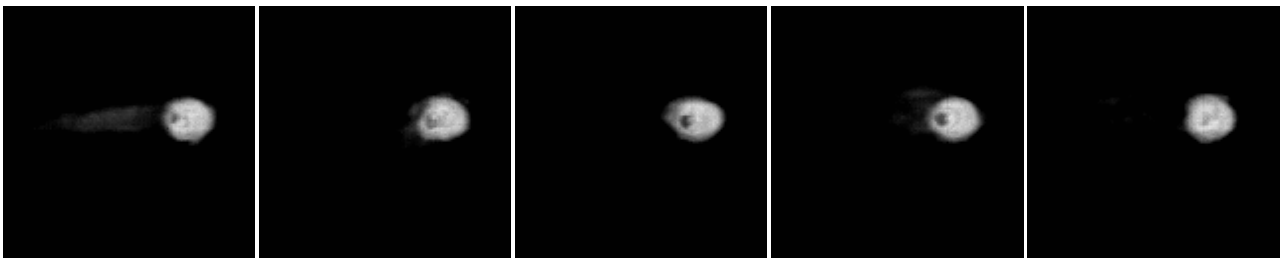


Abbildung 5-28 unbeleuchtete koaxiale Schweißprozessbilder

Die LWM Plattform ist um die Hardware zur Bildverarbeitung erweitert. Dabei ist für den Serieneinsatz keine Aufzeichnung von Videos vorgesehen. Die eingerichtete Software errechnet aus den durchlaufenden Einzelbildern oder kleineren Bildergruppen die Parameter Intensität, Kantenqualität und das Hinterkantensignal.

Für den Einrichtbetrieb wurde eine zweite LWM-C Grundplattform verwendet. Mit dieser wurden die Aufnahmen von Einricht-Testschweißungen komplett zwischengespeichert und dann zum Einstellen der Auswerteparameter verwendet. Der Einrichtvorgang war auf Grund der vielen einzustellenden und zu variierenden Parameter sehr zeitaufwändig und störanfällig.

Aus der Bildverarbeitung werden folgende Informationen gewonnen und mit den Signalen der Einzeldetektoren (Plasma, Temperatur, Rückreflex, Laser) in der LWM Datenbank abgespeichert:

- Intensität: Helligkeitsmittel der Bilder in Grauwerten
- Kantenqualität: Kontrast Schmelze - Umgebung (Qualitätszahl)
- Hinterkante: Länge Keyhole - Schmelze in Pixel

Über die automatisierte Exportfunktion können diese Gesamtdaten einer externen Auswertung und Analyse zugespielt werden. Die Bildrate je Sekunde wurde mit der Abtastrate der Einzeldetektoren synchronisiert und auf ca. 1500 gesetzt.

In drei Versuchsreihen wurden die Abhängigkeiten der Signale vom Spalt aufgezeichnet:

- konstanter Spalt, von 0 bis 0,5 mm in 0,05 mm Schritten, über der gesamten Schweißlänge
- Fehlerprovokation: Keilspalt von 0 mm bis 0,8 mm
- Fehlerprovokation: Keilspalt von 0,8 mm bis 0

Blech oben	DC06 ZE 50/50 BPO; 0,75 mm dick
Blech unten	DX 53 D Z140 MB 1,5 mm dick
Nahtlänge	50 mm
Schweißlage	horizontal-horizontal
Laserleistung	3500 W
Schweißgeschwindigkeit	60 mm/s
Fokuslage	0
LWM Abtaste	1500 Hz
LWM Signalfilter	ungefiltert und 50 Hz Tiefpass
Videobildaufzeichnung	1500 fps
ROI	128x128 Pixel ²

Tabelle 5-7 Parametersätze für die Testreihen in den Abschnitten 5.3.1.1 und 5.3.1.2

5.3.1.1 Konstanter Spalt über der gesamten Schweißlänge

Die Testschweißreihen wurden in gleicher Systematik wie die im Abschnitt 5.2.2 durchgeführt. Die Proben wurden visuell bewertet und zusätzlich per thermographischer Untersuchung „durchleuchtet“ (Abbildung 5-29). Dabei sind die verschweißten und nicht verschweißten Längenabschnitte gut zu erkennen und zu unterscheiden.

Die zusammenfassenden Darstellungen ausgewählter Nähte zeigen Abbildung 5-30, Abbildung 5-31, Abbildung 5-32 und Abbildung 5-33. Von oben nach unten sind gegenüber gestellt:

- Nahtoberraupe
- Nahtwurzel
- Thermografiebild
- Rückreflex-, Temperatur-, Plasma- und Lasersignalkurven über der Nahtlänge (mit 50 Hz Tiefpassfilter)
- Nahtmerkmaleinschätzung
- aus dem Aufsichtvideo des Schweißprozesses errechnete Wertekurven:
 - Intensität: Helligkeitsmittel der Bilder in Grauwerten
 - Kantenqualität: Kontrast der Schmelzenhelligkeit zur Helligkeit der (erstarrten) Raupe
 - Hinterkante: Länge von der Front zur hinteren Kante (Übergang zur Schmelze) der Dampfkapillare
- Aufsichtbeispielbilder an den Nahtpositionen 5 mm (5 mm) bis 50 mm

Das Potential der zusätzlichen Werte Intensität, Kantenqualität und Hinterkante wird in Tabelle 5-8 diskutiert.

	Intensität [Grauwerte 0 bis 255]	Kantenqualität [0 bis 255]	Hinterkante [Pixel]
Abbildung 5-30 0 mm Spalt	Mittelwert ~150, kurze untere Spitzen korrelieren bedingt mit P-Min-Werten, P-Max-Werte hingegen nicht	Bei Nahtposition 6 mm brechen beide Signale ab, gleichzeitig mit einem Sprung der Rückreflexion. Ursache ist ein Zusammenfall der Dampfkapillare, welchen die Software als Nahtende interpretierte.	
Abbildung 5-31 0,05 mm Spalt	Mittelwert zwischen 150-200 bis Nahtmillimeter 25, dann etwas geringer, korreliert mit Plasmasignal-Verminderung, weniger Min-Ausreißer	Mittelwert etwas über 150, deutliche kurze Peaks, unruhiges Signal	Mittelwert und Schwankungen höher als bei Abbildung 5-32 und Abbildung 5-33
Abbildung 5-32 0,2 mm Spalt	Mittelwert etwas höher als in Abbildung 5-31	Mittelwert etwas höher als in Abbildung 5-31, zahlreiche oben/unten Ausreißer	niedrigeres Niveau und gleichmäßiger als in Abbildung 5-31
Abbildung 5-33 0,5 mm Spalt	bis 15 mm höher, dann ähnliches Niveau wie Abbildung 5-32	deutlich niedriger als Abbildung 5-32 und Abbildung 5-31	bis 15 mm hoch und unruhig, dann niedrig und gleichmäßiger

Tabelle 5-8 Diskussion der zusätzlichen Parameter aus der Bildverarbeitung

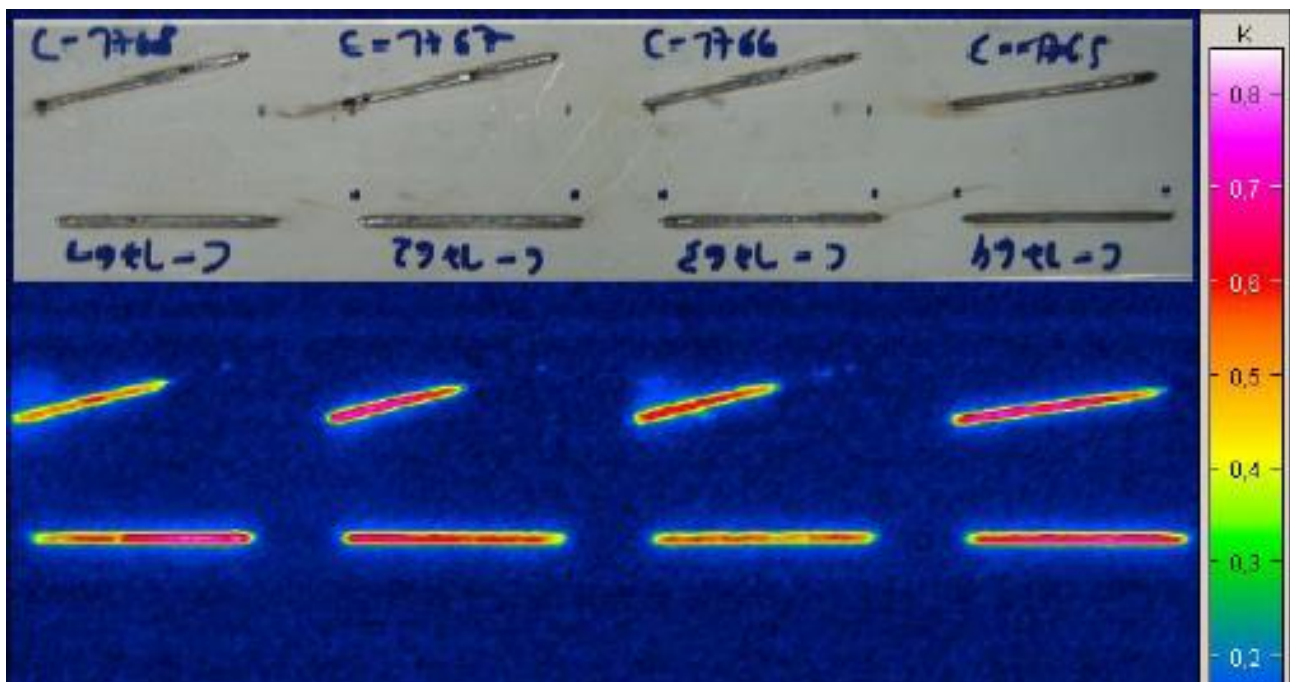


Abbildung 5-29 Thermografiebild von Testnähten [46]

oben: Fotos der Nahtoberraupen

unten: Thermografiebilder (Blitzlicht von hinten); Blau: kein Energiefluss – keine innere Anbindung; Rot: guter Energiefluss – gute Anbindung; Die Nähte C-1768, C-1767, C-1766 sind im Thermografiebild deutlich kürzer als im Foto. D. h., sie haben nicht verschweißte Bereiche – „Falsche Freunde“.

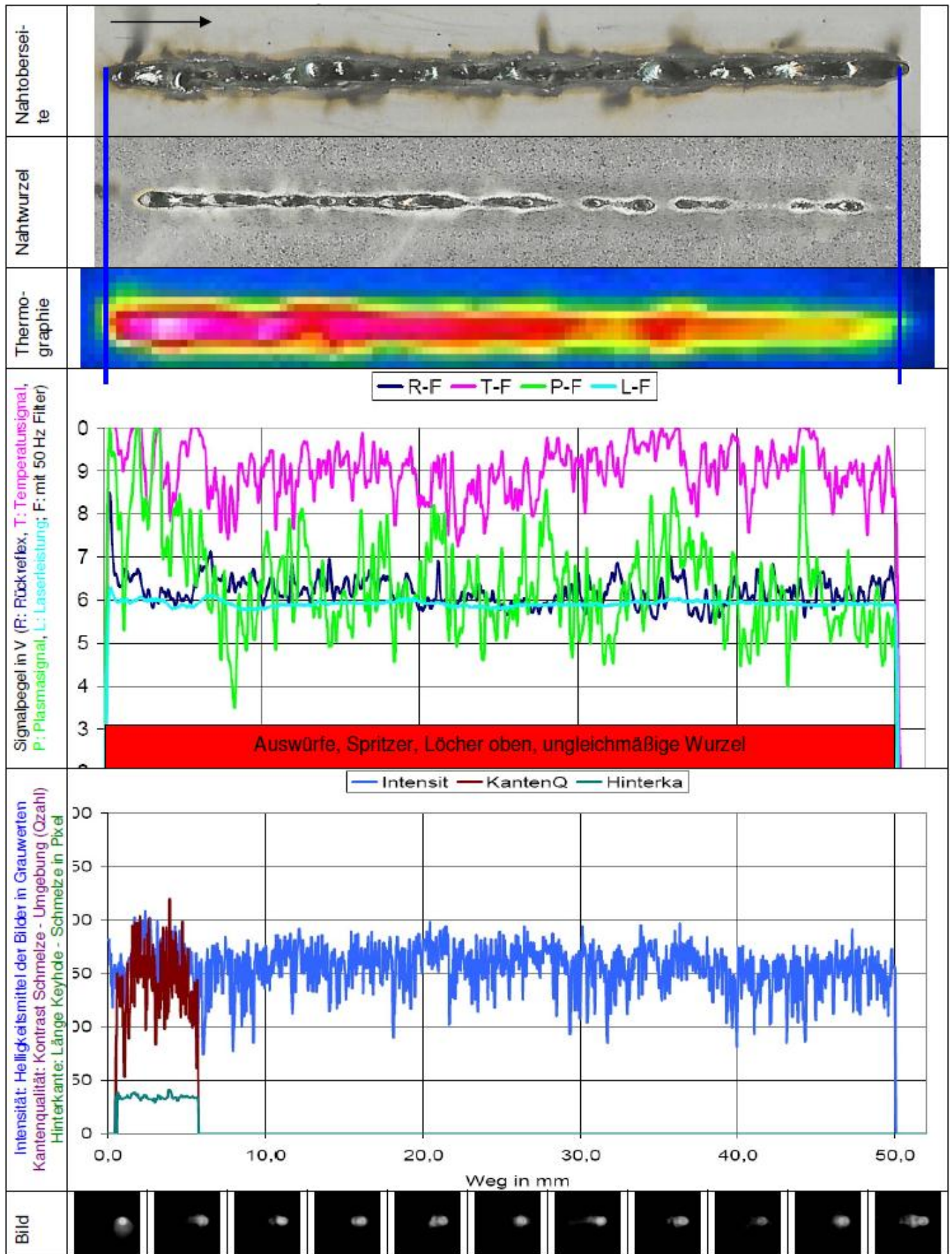


Abbildung 5-30 Konstantspaltschweißung mit 0 mm

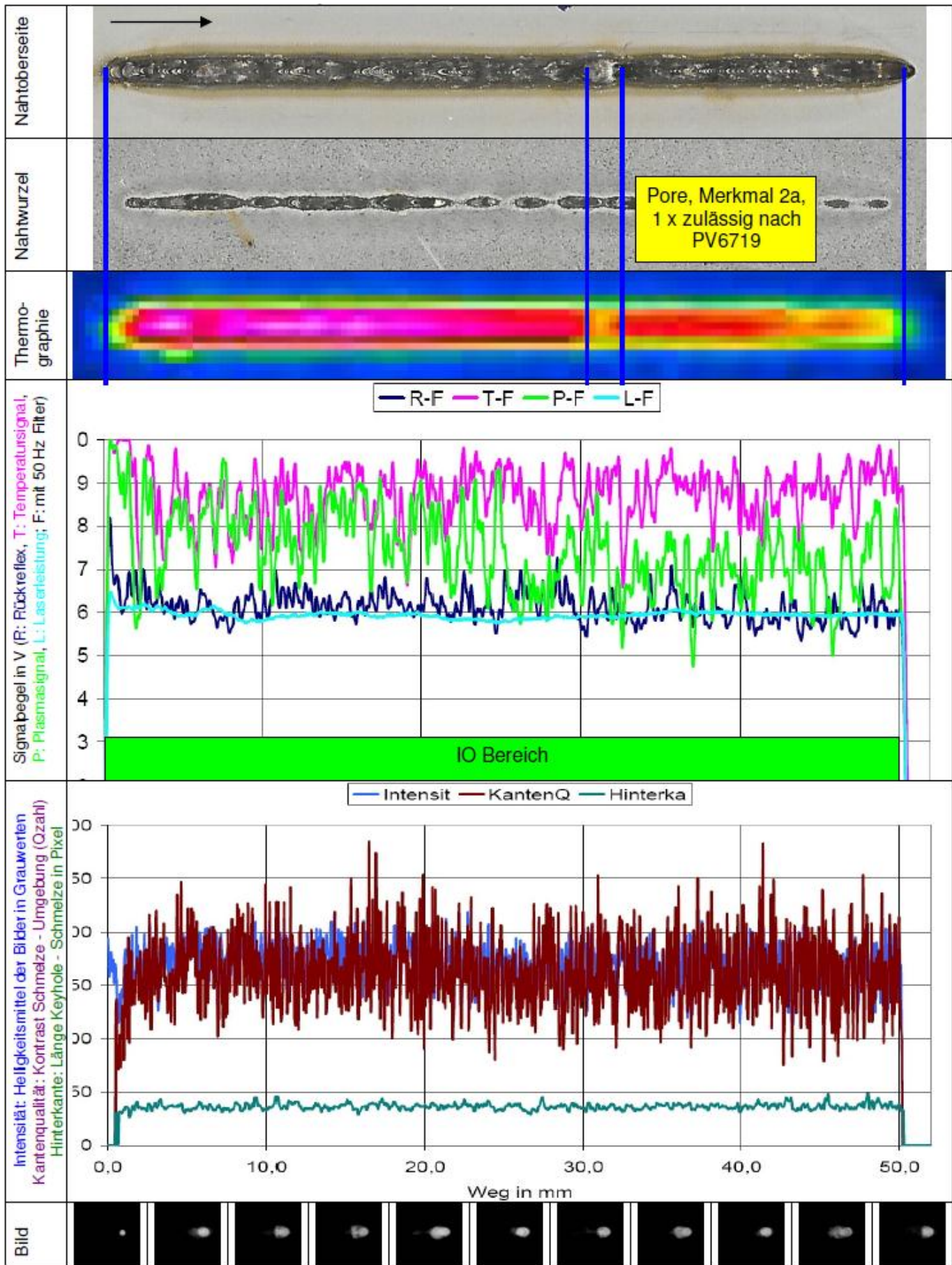


Abbildung 5-31 Konstantspaltschweißung 0,05 mm

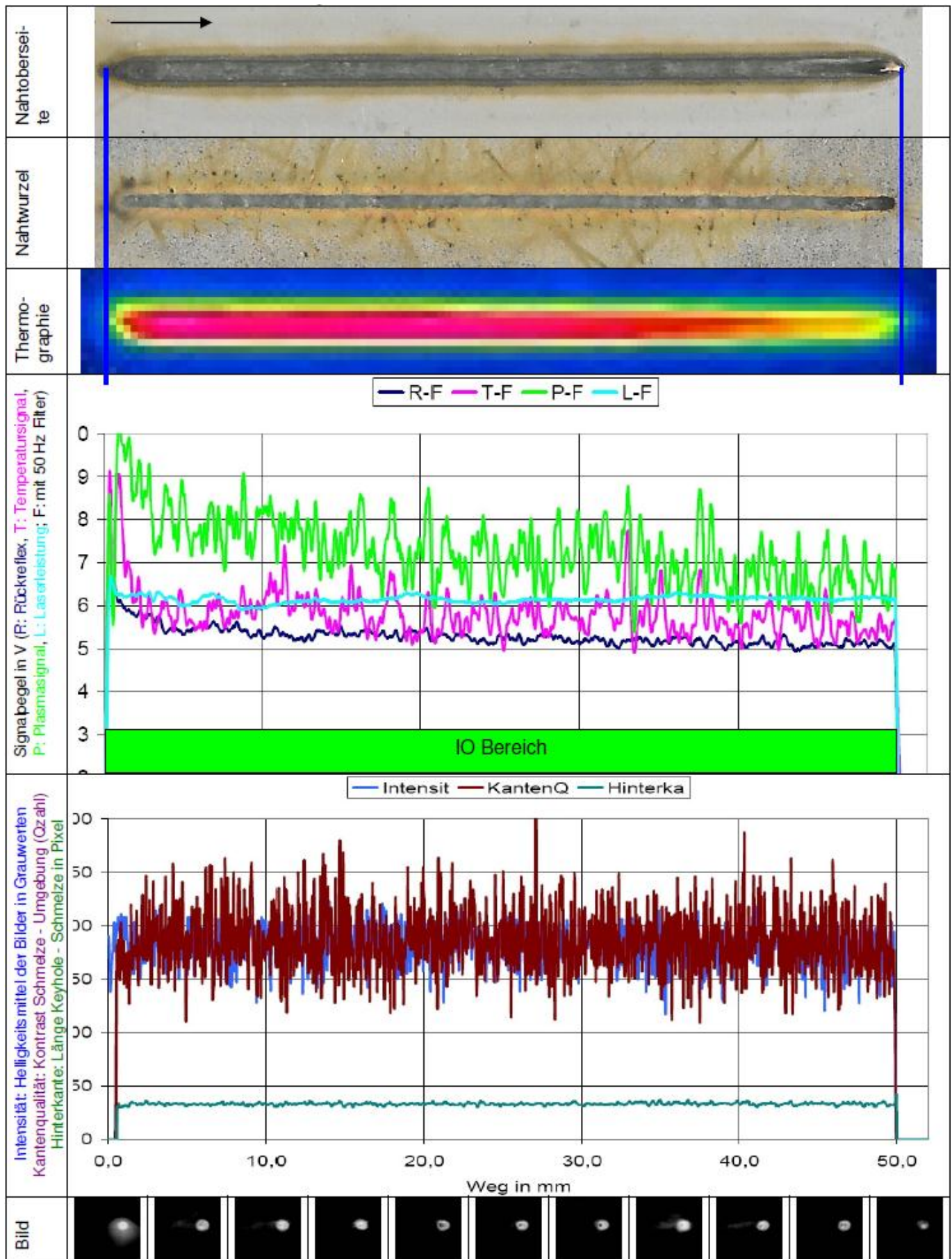


Abbildung 5-32 Konstantspaltschweißung mit 0,2 mm

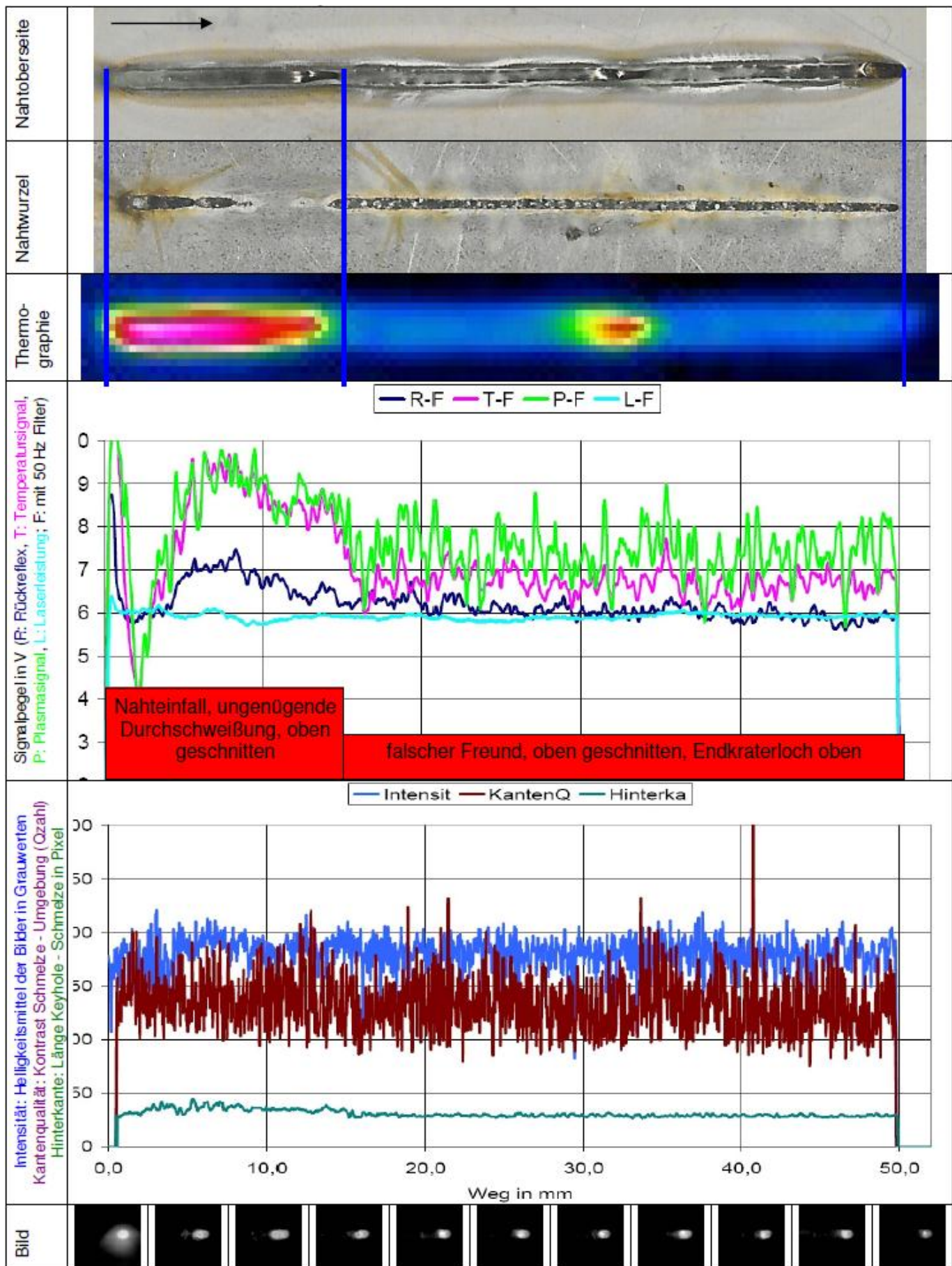


Abbildung 5-33 Konstantspaltschweißung mit 0,5 mm

In Abbildung 5-34 und Abbildung 5-35 sind die Signalpegel der Konstantspaltschweißungen über dem Spalt aufgetragen. Die RTPL Signalverläufe (Abbildung 5-34) zeigen die bereits bei vorherigen Reihen ermittelten prinzipiellen Verlaufsformen.

Die aus der coaxialen Prozessbeobachtung zusätzlich gewonnenen Signale: Intensität, Kantenqualität und Hinterkante sind in Abbildung 5-35 aufgetragen.

Die Mittelwerte der Intensität der Grauwerte aller Pixel der Filmeinzelbilder ist im Kurvenverlauf mit den Plasmasignalen vergleichbar.

- Anstieg zwischen 0 und 0,1 mm Spalt – Bereich großer Spritzergefahr und ungenügender Durchschweißung
- Fast linearer Abfall von 0,1 mm bis 0,3 mm (0,35 mm) Spalt – iO-Bereich
- Minimum, steiler Anstieg, Maximum von 0,3 mm bis 0,4 mm (0,45 mm) Spalt – Gefahr des Nahteinfalles der Oberraupe
- Abfallender Pegel ab 0,4 mm Spalt – Oberblech geschnitten, Erzeugung falscher Freunde

Das Kantenqualitätssignal hat deutlich höhere Werte, zeigt demnach deutlich bessere Kantenqualitäten, ruhigeres Schweißverhalten, abgegrenztere Kapillarformen im iO-Schweißbereich zwischen 0,15 mm bis 0,3 mm Spalt.

Das Hinterkantensignal, als Pixelwert, der eine Aussage über die Länge der Dampfkapillare machen sollte, ist wenig bewertbar. Dies liegt neben dem Darstellungsmaßstab an der geringen verwendbaren Auflösung der Kamera (128 x 128 Pixel²) und den noch weniger signifikanten Pixeln zur Auszählung der Keyholgröße (ca. 30 bis 40).

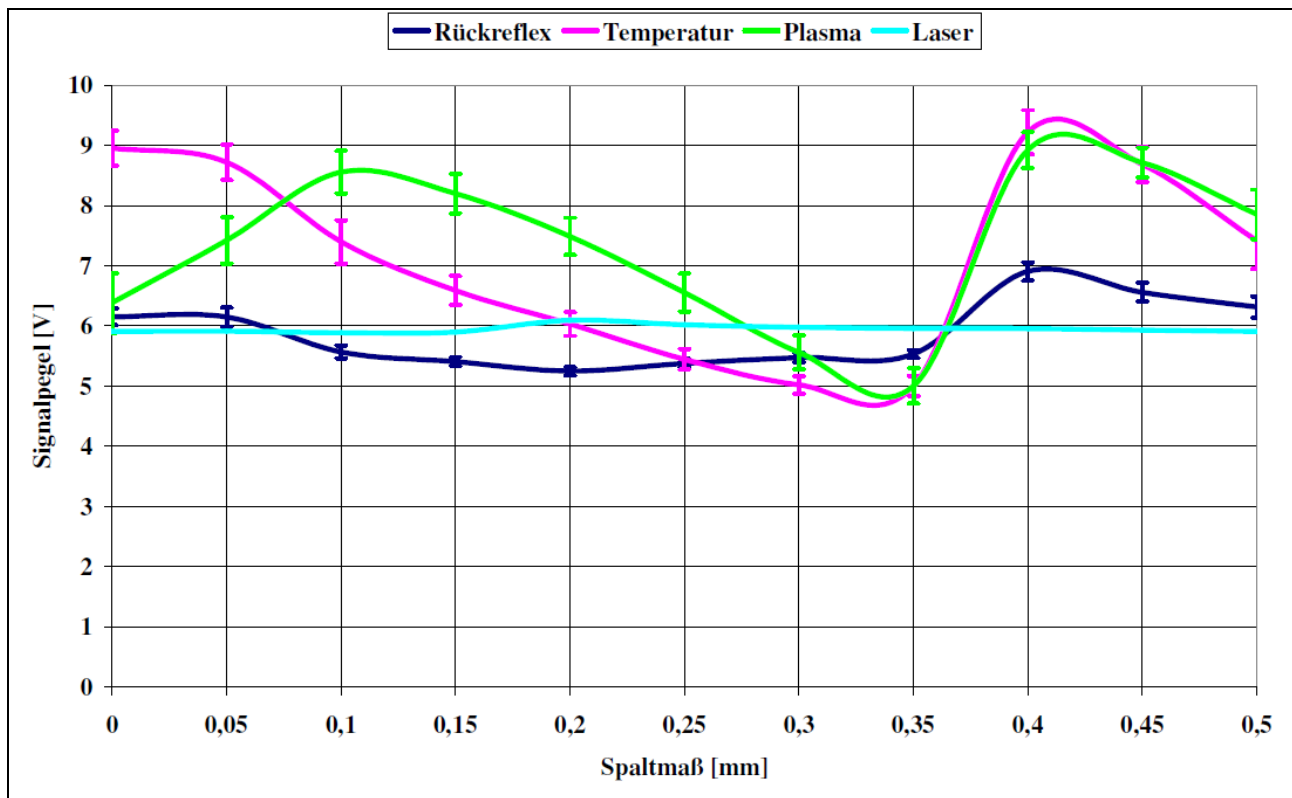


Abbildung 5-34 RTPL-Signalpegel über dem Spalt

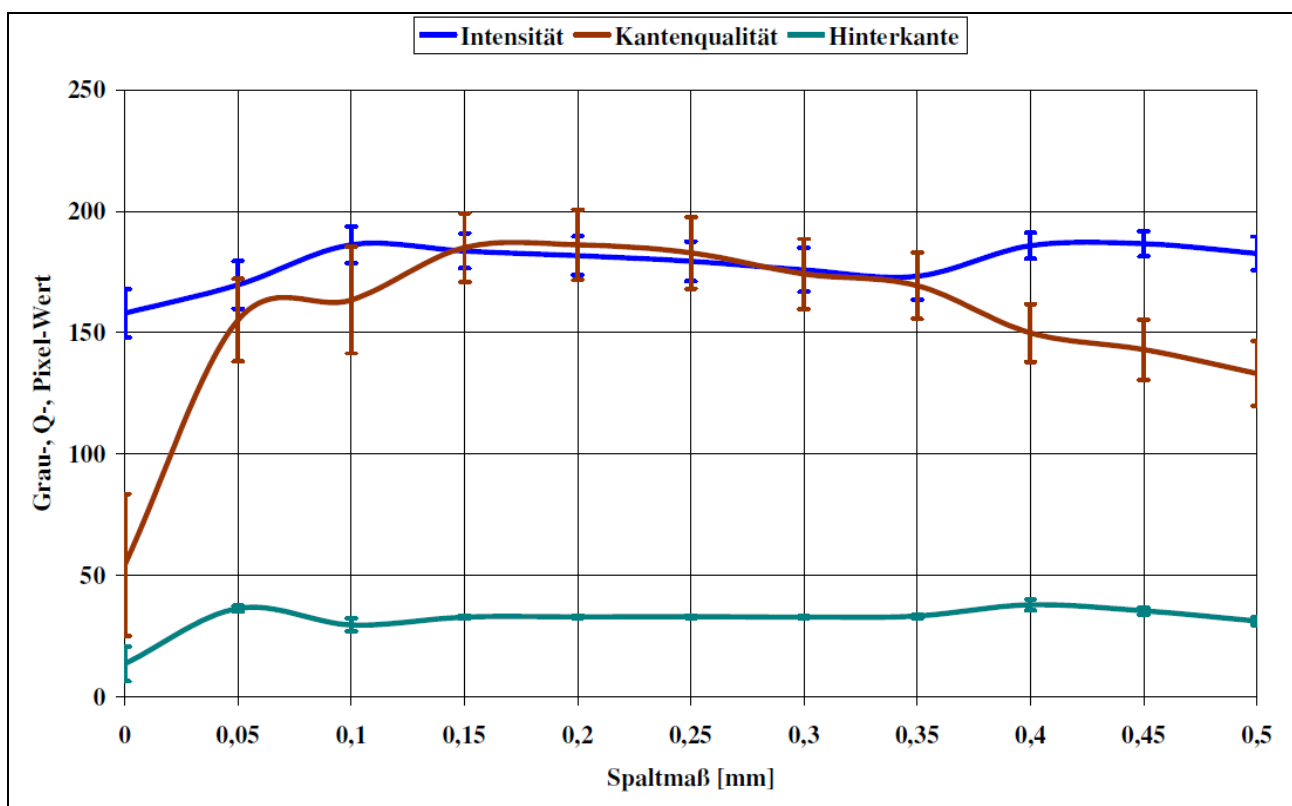


Abbildung 5-35 Intensität, Kantenqualität, Hinterkante über dem Spalt

5.3.1.2 Versuche am Keilspalt

Mit der Testreihe wurden die Auswirkungen auf die Signalverläufe bei veränderlichen Schweißspalten im Nahtverlauf (Abbildung 5-36) aufgezeichnet. Zwei zusammenfassende Darstellungen ausgewählter Nähte zeigen Abbildung 5-37 und Abbildung 5-38.

Abbildung 5-37: Schweißen mit steigendem Spalt; folgender Merkmalsverlauf

- keine Spritzer und Auswürfe am Anfang (kein 0-Spalt)
- iO-Bereich mit deutlichen Schmauchspuren an der Blech-Unterseite
- steigender Nahteinfall, sinkende Durchschweißung
- starker Nahteinfall, ungenügende Durchschweißung
- oben geschnitten
- kein „Falscher Freund“

Die Schweißung bestätigt die Verlaufsformen der RTP-Signalpegel und deren Abhängigkeit vom Schweißspalt aus den vorangegangenen Versuchen. Die geringe Rückreflexion und die deutlichen unteren Schmauchspuren im iO-Bereich sind Hinweise auf eine nach unten geöffnete Dampfkapillare. Die Dampfkapillare ist in diesem Abschnitt annähernd rund und dem entsprechend das Hinterkantensignal gering. Dem gegenüber sind in den Abschnitten mit deutlichem Nahteinfall die RTP Pegel hoch, bei mangelnder Durchschweißung ist die Kapillare gestreckter, die Hinterkantenwerte etwas höher und die Kantenqualität geringer.

Abbildung 5-38: Schweißen mit fallendem Spalt; folgender Merkmalsverlauf

- „Oben geschnitten“ und „Falscher Freund“; keine Schmelzenvereinigung durch den großen Spalt
- Nahteinfall; plötzliche Vereinigung der Schmelzen, Volumenbedarf für Spaltschließung
- iO-Bereich mit deutlichen Schmauchspuren an der Blech-Unterseite
- geringe Durchschweißung, jedoch keine Spritzer und Auswürfe (kein 0-Spalt)
- Endkraterloch oben

Die RTP-Kurven zeigen teilweise steilere Flanken. Die Signalhöhen sind jedoch vergleichbar. Im Abschnitt Nahteinfall finden im Gegensatz zum steigenden Spalt in Abbildung 5-37 plötzliche Signalpegeländerungen statt. Diese plötzlichen Änderungen sind ein Indiz dafür, dass die vorher getrennten Einzelschmelzen sich vereinigt haben. Während des Abschnittes „Falscher Freund“ ist das Hinterkantensignal etwas geringer und gleichmäßiger als in den Abschnitten iO und geringe Durchschweißung. Das wiederum sehr unruhige Signal Kantenqualität zeigt höhere Werte im iO Bereich mit sehr deutlicher Durchschweißung.

Die Versuche belegen die Annahme, dass für die Fehlerdetektionen neben den Absolutwerten einzelner oder mehrerer Signalquellen, auch deren Verläufe Aussagekraft besitzen können. Die Verläufe haben unterschiedliche Formen je nach dem Richtungssinn relativ zur Fehlerursache. Die Wahrscheinlichkeit langer nicht verschweißter Abschnitte ist bei gleichem Spalt höher, wenn die Schmelzen vorher noch nicht vereinigt waren. In der Fertigungspraxis wird dieser Tatsache entsprochen, indem Nähte von den günstigeren Spanbedingungen beginnend programmiert werden.

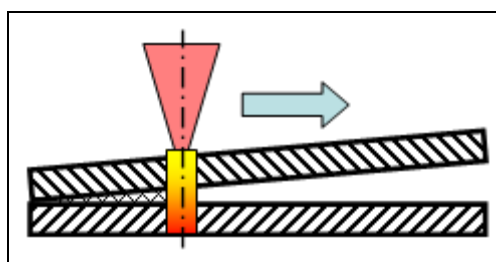


Abbildung 5-36 ansteigender Keilspalt

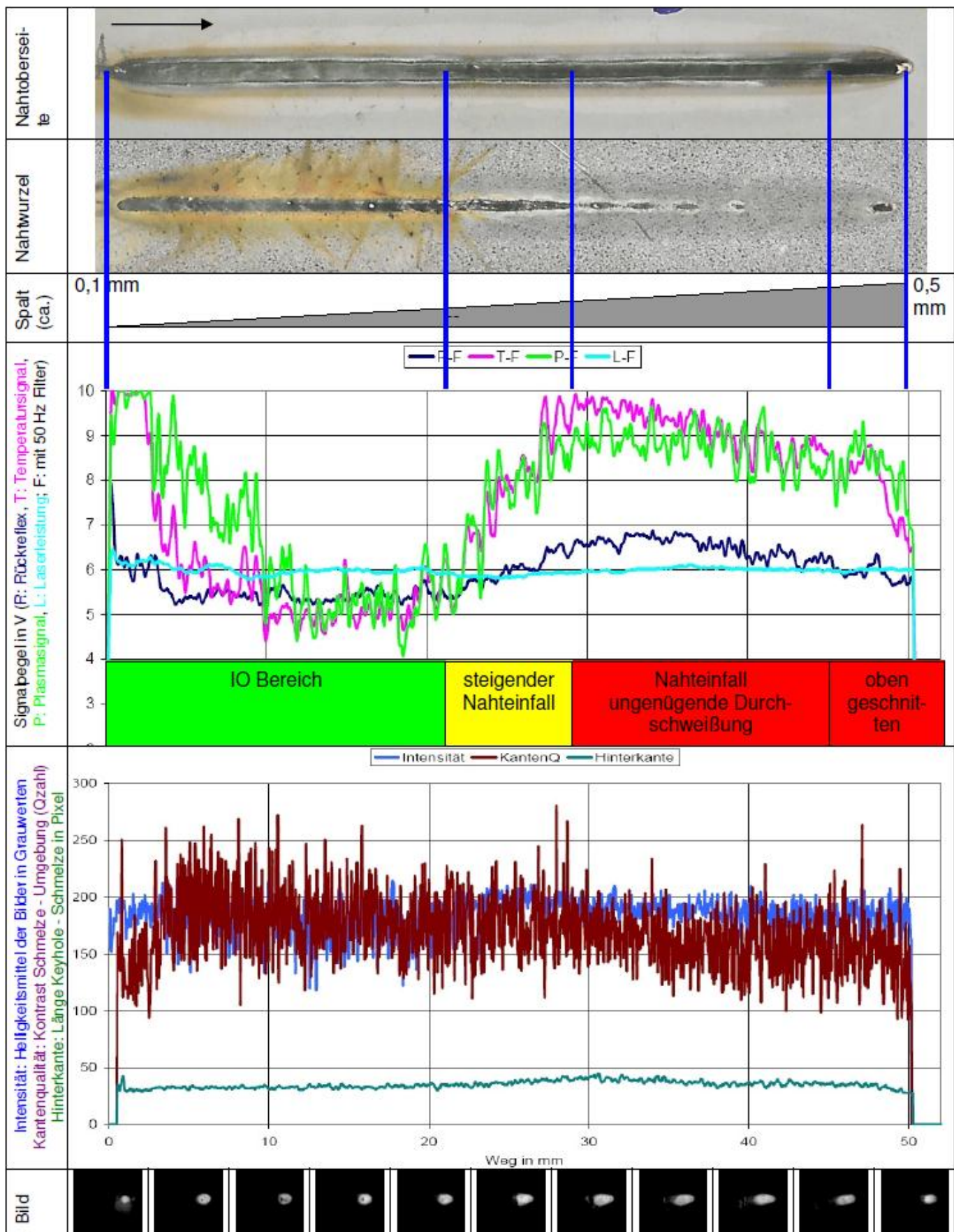


Abbildung 5-37 Schweißen mit steigenden Keilspalt

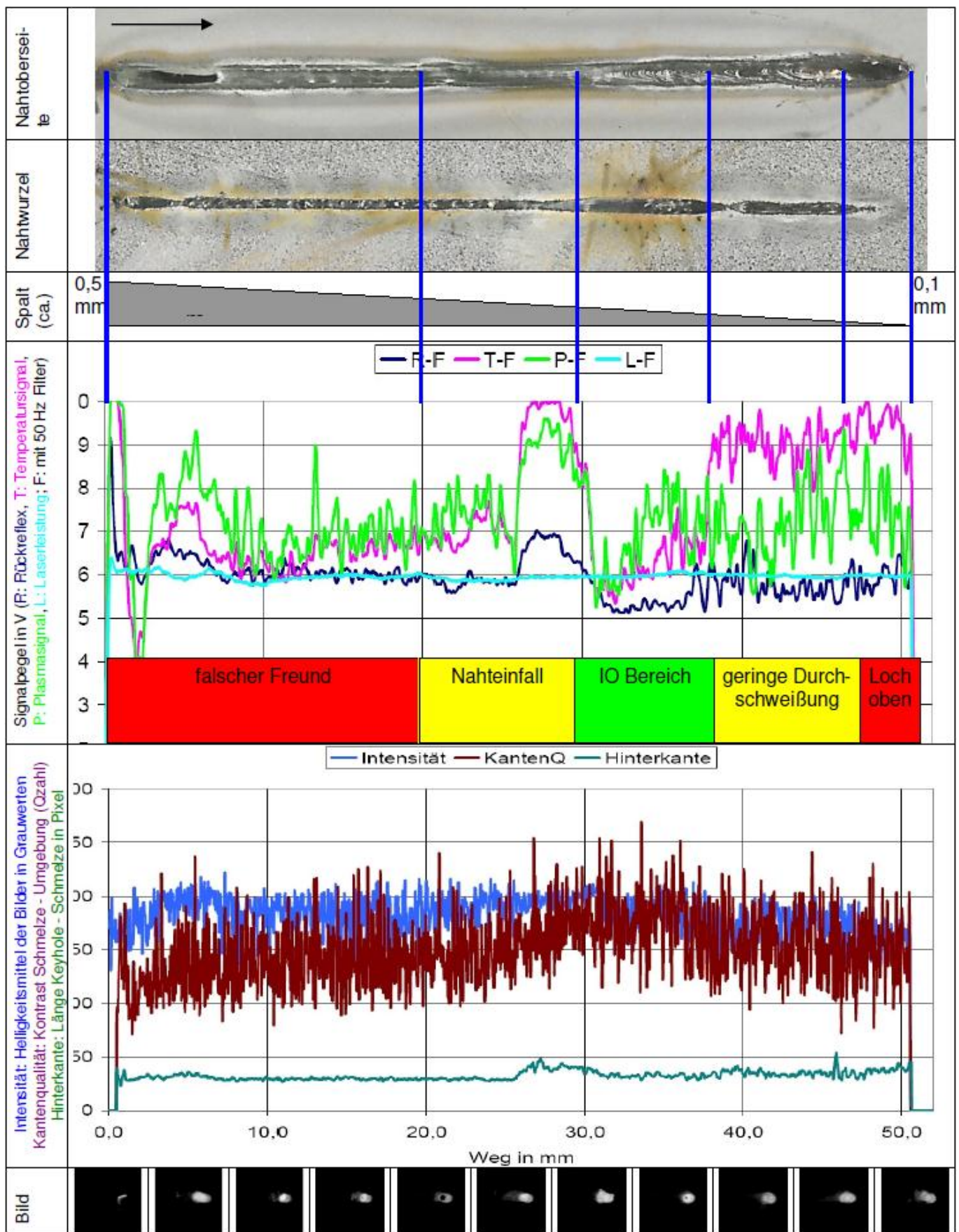


Abbildung 5-38 Schweißen mit fallenden Keilspalt

5.3.2 Messung der Dampfkapillare und der Schmelzbadlänge

Die koaxiale Videoaufzeichnung des Schweißprozesses mit steigendem Spalt der Naht in Abbildung 5-37 wurde im FhG IWS per Bildverarbeitung analysiert und die „Schmelzbadlängen“ ermittelt (Abbildung 5-39). Deren Werte über der Nahtlänge aufgetragen ergibt ein dem Rückreflex-Signal ähnliches Diagramm. Das Minimum (~100 %) zu Maximum (~180 %) –Verhältnis der Kurve ist wesentlich deutlicher als beim Hinterkantensignal aus der LWM-C Berechnung.

Im iO-Schweißbereich ist in den Videobildern die untere Öffnung der Kapillare deutlich als dunkler Punkt zu sehen. Dieser ist ein Indiz für genügende Durchschweißung, kann jedoch auch bei Nähten ohne Anbindung („Falsche Freunde“) vorhanden sein.

In dieser Auswertung wird das Defizit der Prozessbeobachtung ohne Fremdbeleuchtung deutlich. Die Aufnahmen zeigen trotz angewandeter Bildbearbeitungsmethoden im Wesentlichen die Formänderungen der Dampfkapillare, Abmessungen und Formen der noch flüssigen Schmelze sind nicht erkennbar.

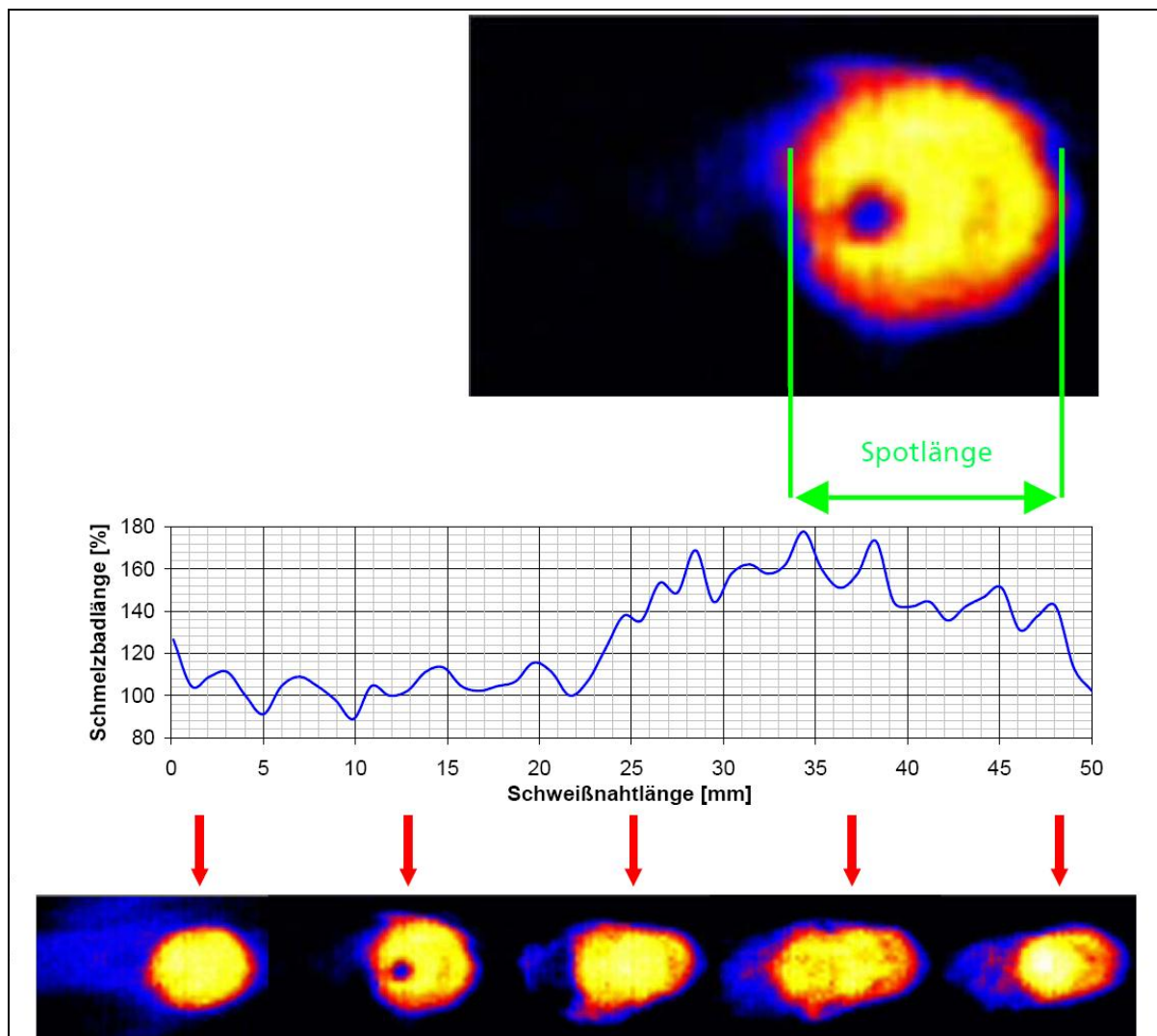


Abbildung 5-39 Ermittlung der Dampfkapillarenlänge aus koaxialem Prozessvideo entlang der Nahtlänge bei steigendem Schweißspalt [FhG IWS]

5.3.3 Off-axis Prozessbeobachtung

Durch die Inbetriebnahme einer achten Roboterachse als zusätzlichen Lineartisch wurden die Voraussetzungen zur off-axis Beobachtung des Schweißprozesses geschaffen. Laserstrahlposition und extern angebrachte Beobachtungstechnik sind dabei fixiert und die zu verschweißenden Werkstücke (Proben) werden translatorisch bewegt.

In Abbildung 5-40 ist die Laboreinrichtung mit Laserbearbeitungskopf, Spannvorrichtung auf achter Achse mit Proben, Kamera und Zusatzbeleuchtung mit Crossjetdüsen zu sehen. Nicht montiert ist in diesem Foto das zusätzliche Schutzgehäuse mit Schutzglas für die Kamera.

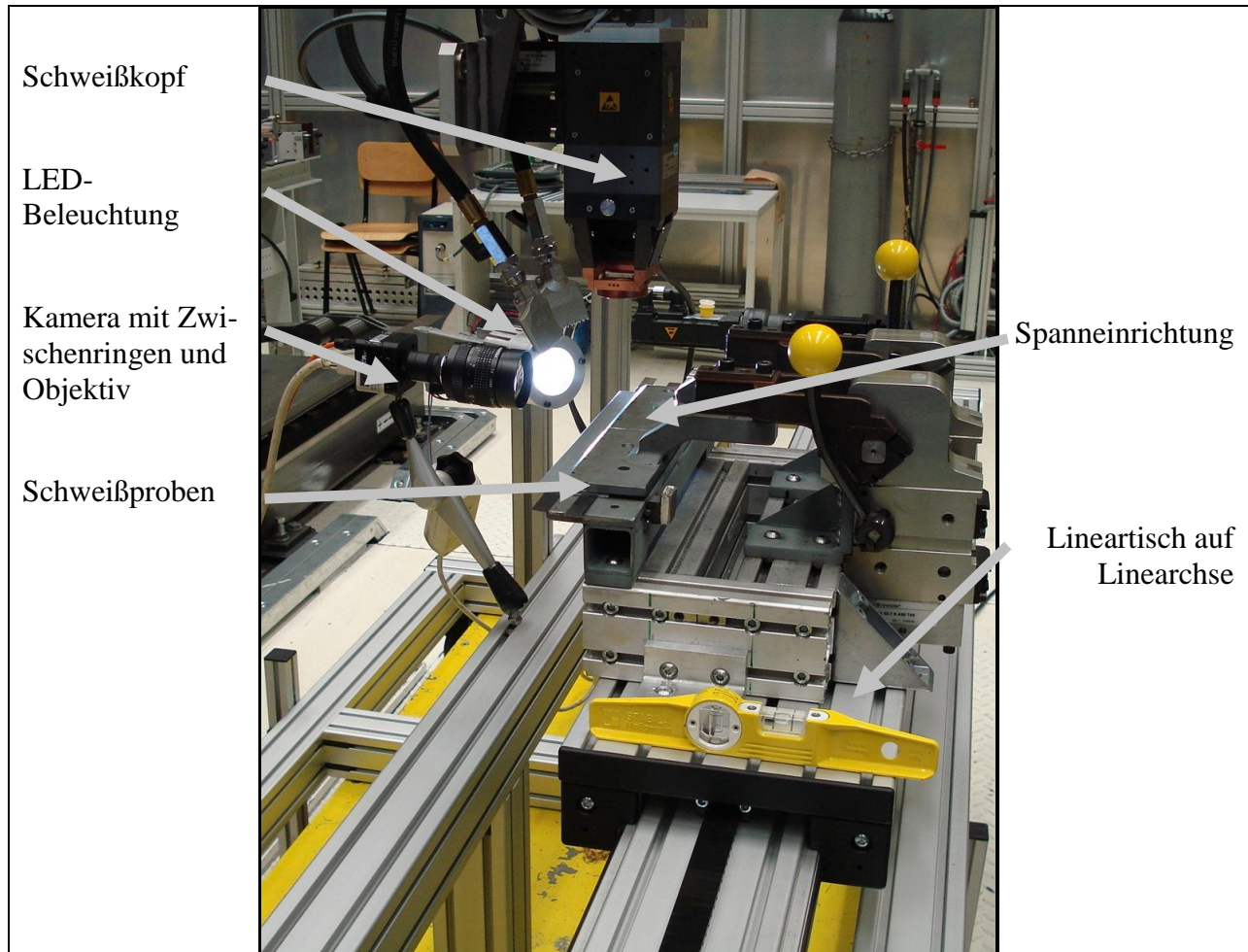


Abbildung 5-40 Laboreinrichtung zur off-axis Beobachtung

Mit dieser Anordnung wurde erstmals seitlich direkt in den Spalt hinein, zwischen den Blechen beobachtet. Die Schweißnähte wurden 5 mm vom Probenrand angeordnet, so dass die Nähte vom Randabstand nur unwesentlich beeinflusst wurden, jedoch eine gute Sichtbarkeit der Vorgänge möglich war. Die Beobachtung des Schweißbeginns zeigt Abbildung 5-41. Es wurden zwei Bleche ZStE 340 Z100 1,5 mm mit 3000 W, 30 mm/s, 0,2 mm Spalt in Wannenlage verschweißt.

Die Aufnahmen sind mit 411 Bildern je Sekunde aufgezeichnet. Damit ist ersichtlich, dass der Laserstrahl das obere Blech in ~14 ms durchdrang. Für das untere Blech werden ~28 ms benötigt. Zu erkennen sind zudem das Prozessleuchten im Spalt zwischen den Blechen und teilweise die Schmelze und deren Verhalten. Unter Nutzung der geplanten Laser Zusatzbeleuchtung erfolgen im Abschnitt 5.3.6 weitere Untersuchungen zum Schmelzenverhalten.

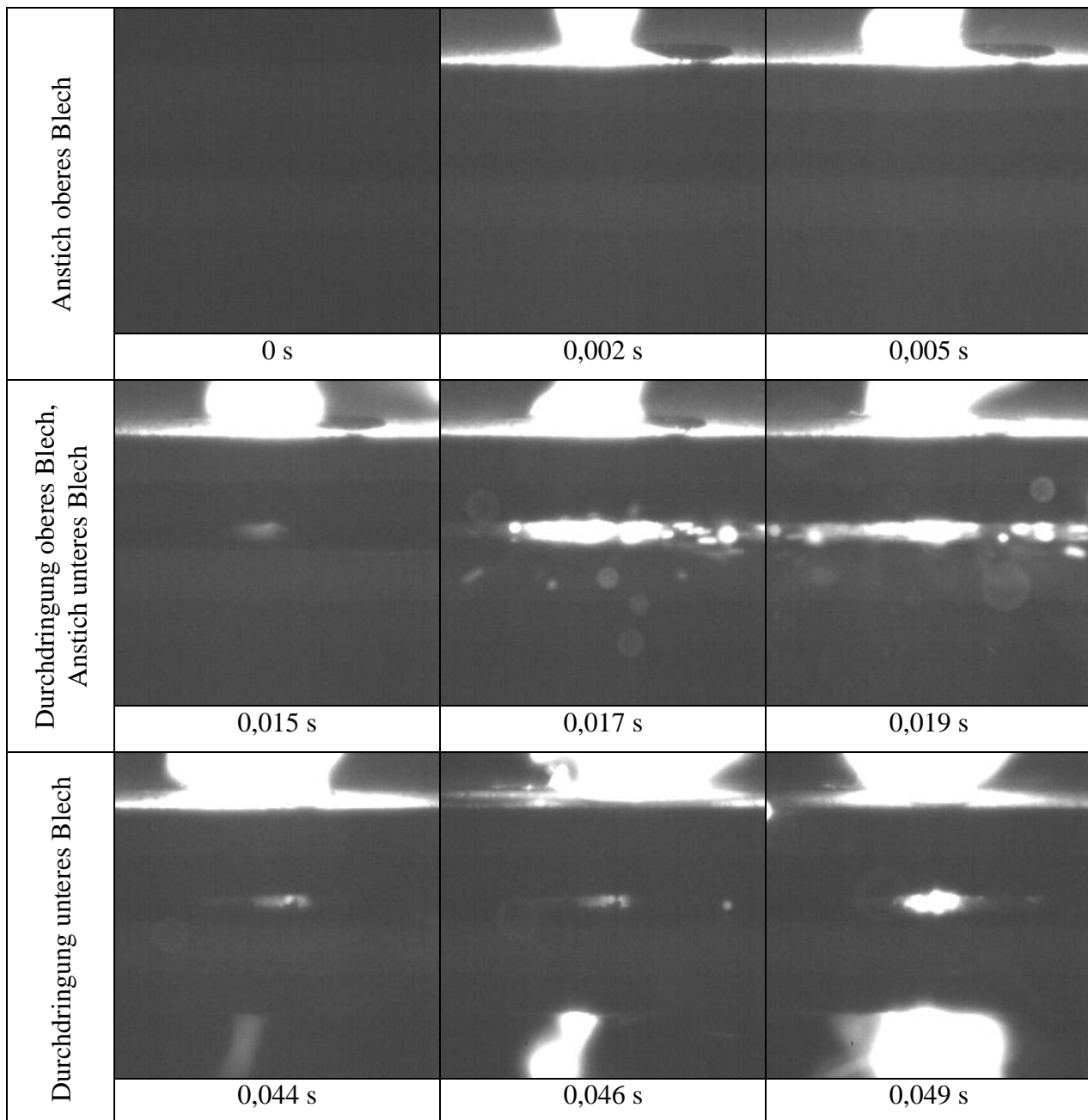


Abbildung 5-41 Beginn einer Schweißung mit 0,2 mm Spalt

5.3.4 Charakterisierung der Durchschweißung

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS Dresden) wurde die „Machbarkeitsstudie zur Charakterisierung der Durchschweißung an Überlappschweißverbindungen“ in der Laserzelle der Volkswagen Sachsen GmbH durchgeführt. Die Durchführung und die Gesamtergebnisse sind in [47] und [48] dokumentiert. In Teiluntersuchungen wurde der Schweißprozess mit einem Diodenlaser beleuchtet. Damit konnte die Bildqualität der aufgezeichneten Prozessvideos entscheidend verbessert werden.

Die Abbildung 5-42 demonstriert den Versuchsaufbau. Durch die Anordnung von gewinkelten Aluminiumblechen als Reflektoren wurden mit einem Beleuchtungslaser die Ober- und Unterseite der Schweißprobe beleuchtet. Die Kamera (Dalsa) zur Beobachtung der Oberseite (Oberraupe) ist koaxial am Bearbeitungskopf, die (Loglux) für die Unterseite (Nahtwurzel) ca. im 20° Winkel zur Strahlaustrittsachse angeordnet. Zusätzlich wurden mit einer Thermografiekamera die Tem-

peraturfeldänderungen auf der Unterseite, hinter der Kapillare in und um den Schmelzenbereich aufgezeichnet.

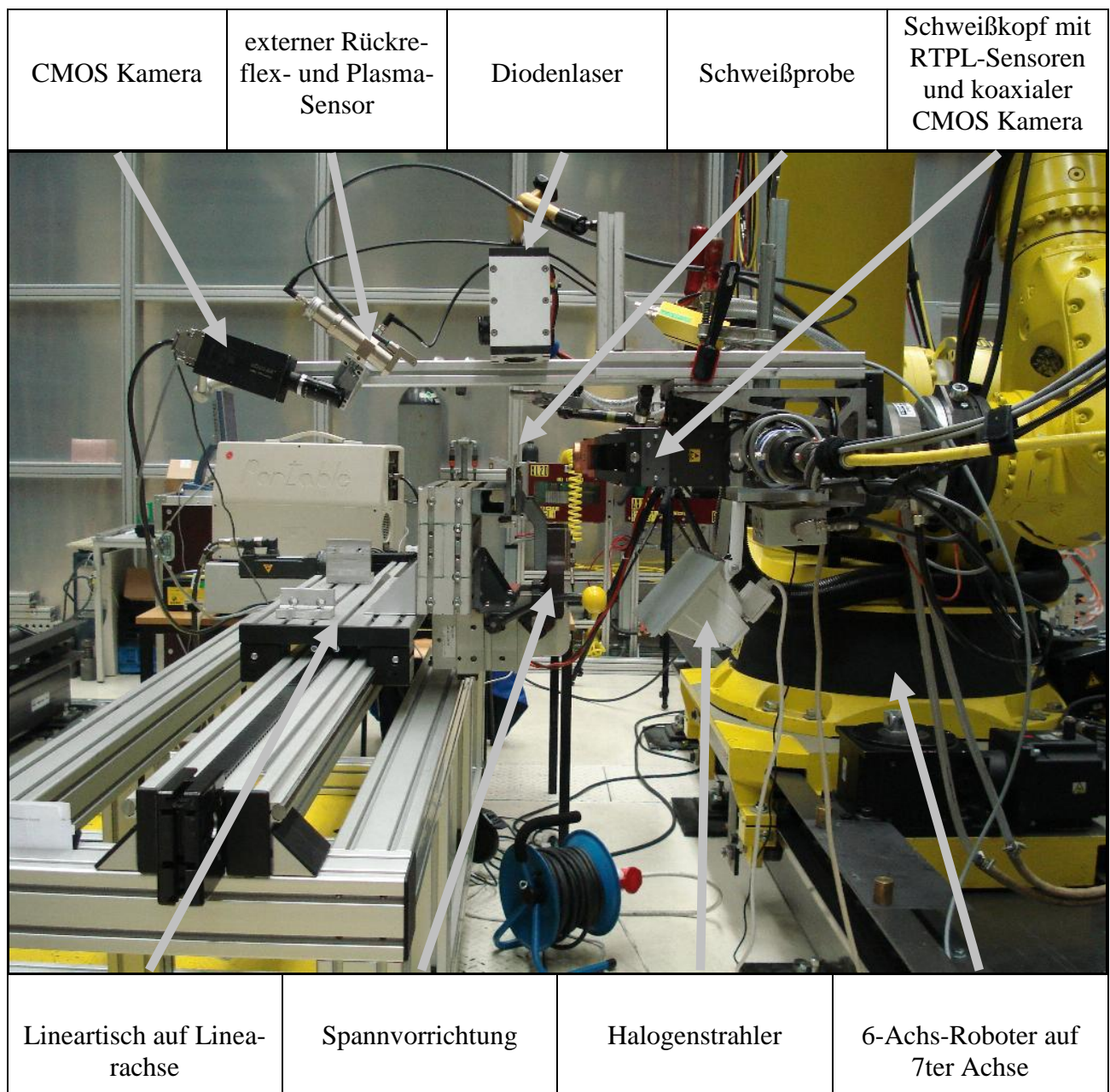


Abbildung 5-42 Versuchsaufbau in Zusammenarbeit mit IWS bei Volkswagen Sachsen

Die Einzelbilder in Abbildung 5-43 deuten die erzielbare Prozessvisualisierungsqualität an. Auf der Strahleintrittsseite sind die Kapillare und die flüssige Schmelze gut zu erkennen. Die Reflexionen in der Schmelze müssen von der Laser Zusatzbeleuchtung stammen, da vor der Kamera ein entsprechender Bandpassfilter angeordnet war. Auf der Strahlaustrittsseite sind die untere Öffnung der Dampfkapillare und die anschließende Schmelze erkennbar. Ersichtlich ist beim Vergleich Oberraupe zu Nahtwurzel der geringe Unterschied der Schmelzbadlängen für diese Prozessparameter.

Auf Grund dieser Erfahrungen wurde die Auslegung und Entwicklung einer genau den Erfordernissen angepassten Diodenlaserbeleuchtung initiiert.

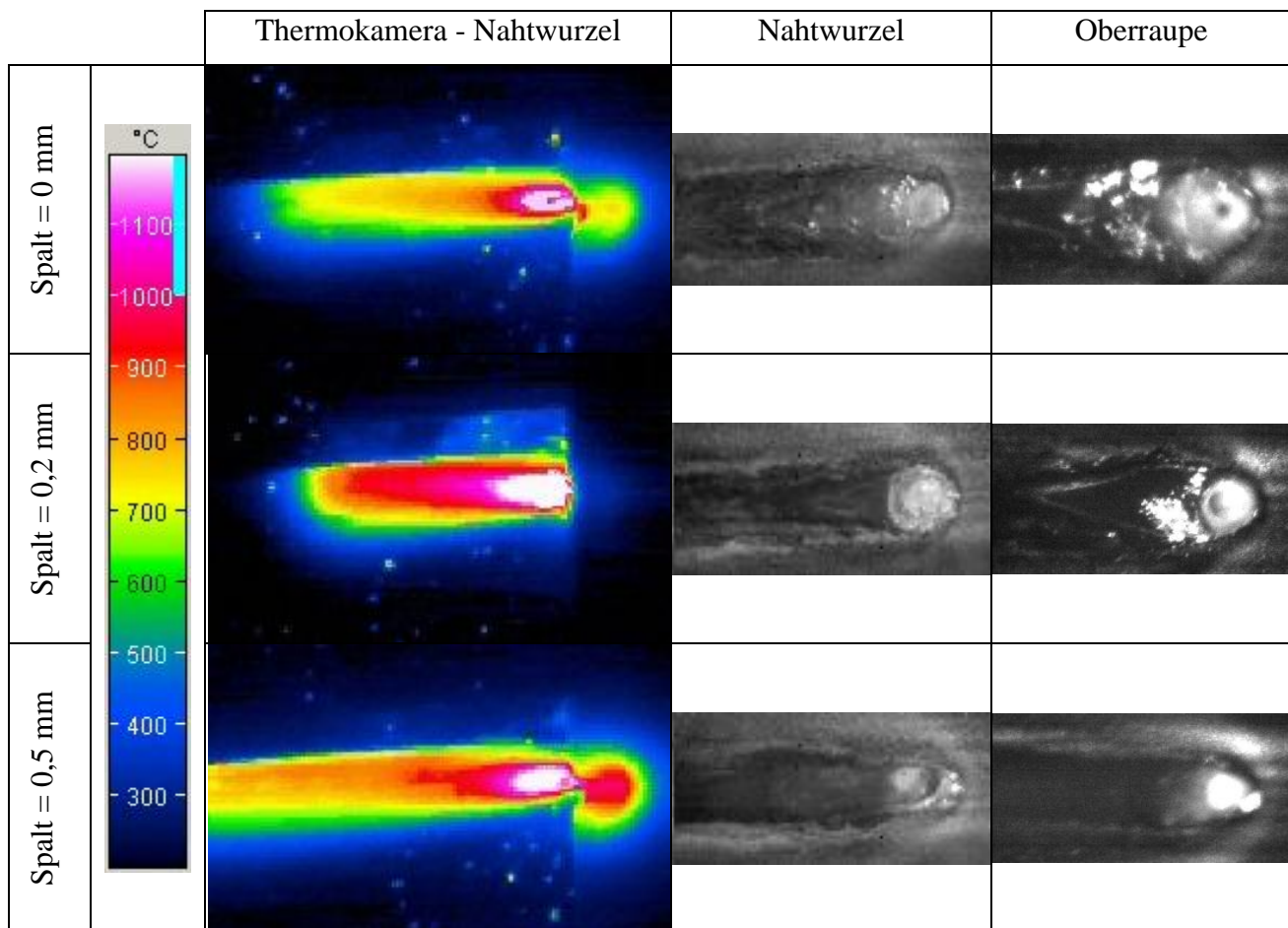


Abbildung 5-43 Standbild jeweils des Thermografie und der mittels Diodenlaser ($\lambda=940$ nm) beleuchteten Oberraupe und Nahtwurzel dreier Schweißnähte (DC06 ZE 50/50 BPO 0,75 mm auf ZStE 340 Z100 1,5 mm; PC Position, Laserleistung 3000 W, Schweißgeschwindigkeit 25 mm/s)

5.3.5 Auslegung geeigneter Schweißprozessbeleuchtung

Bei den Versuchen in 5.3.4 wurde ein 300 W Diodenlaser mit 940 nm Wellenlänge ohne strahlformende Optiken, d. h. relativ ungerichtet aus den Diodenlaserbarren strahlend, verwendet. Es wurde also nur ein unbekannt geringer Leistungsbruchteil zur Beleuchtung des relevanten Schweißbereiches verwendet und bei dieser Wellenlänge haben die verwendeten CMOS Kameras eine geringe Empfindlichkeit (Abbildung 5-44 und Abbildung 5-45).

Die Aufgabe war somit die optimale Wellenlänge für die gleichmäßige Beleuchtung des Umfeldes der Dampfkapillare mit einem Radius von ca. 4 mm bis 5 mm bei minimal erforderlicher Leistung zu ermitteln und einen Prototyp anzufertigen.

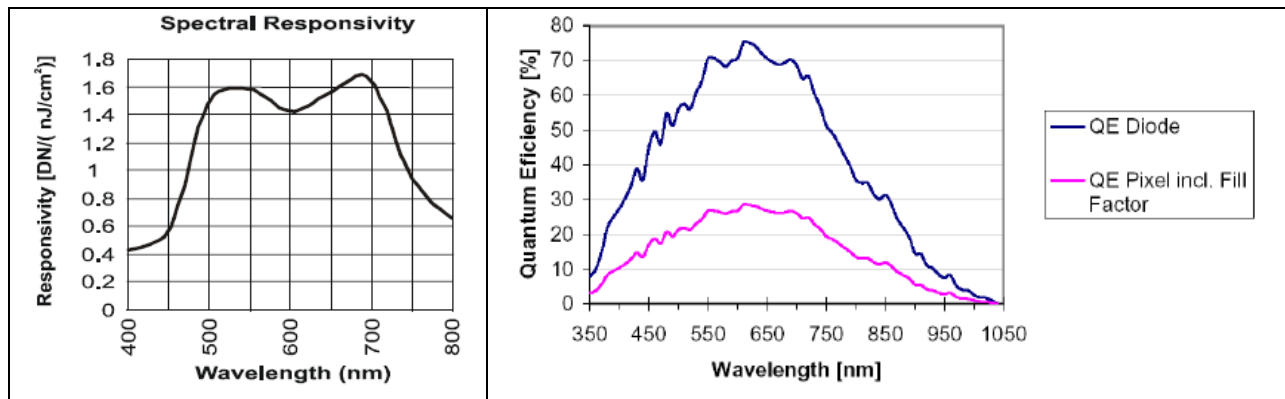


Abbildung 5-44 Spectral Responsivity [49]

Abbildung 5-45 Quantum Efficiency as a Function of Wavelength [49]

Mit optischen Bandpassfiltern von 400 nm bis 800 nm in 50 nm Abstufungen im Kameralichtweg wurde die Wellenlängenabhängigkeit untersucht. Als Beleuchtung diente eine 1000 W Halogenlampe und für 800 nm ein Diodenlaser mit ~2 W. Festgestellt wurde ein qualitativer Unterschied im Leuchten des Metaldampfes zwischen den Aufnahmen von 400 nm bis 600 nm und 650 nm bis 800 nm. Die Beleuchtungswellenlänge wurde demzufolge für den oberen Bereich festgelegt, wobei 650 nm, da noch im menschlichen VIS Bereich, zu bevorzugen ist. Die Abschätzung der erforderlichen Leistung ergab Werte zwischen 4 W bis 8 W, was verhältnismäßig und erfreulich wenig ist. Jedoch waren in dieser Leistungsgröße noch keine Laserdioden im angestrebten Wellenlängenspektrum zu vertretbaren Preisen am Markt erhältlich.

Weitere Tests erfolgten mit einem Lasermodule des Typs *RLDB808-4000-5*, 808 nm, 4.0 W, *focusable* von Roithner Lasertechnik Wien (Abbildung 5-46). Mit diesem Modul wurde die Leistungsabschätzung bestätigt. Nachteilig ist jedoch der Rechteckspot von 4x6 mm², der zudem leicht inhomogen (streifig) ist.

In Abbildung 5-48 sind die *ersten* 100 Bilder einer in dieser Kombination mit der CMOS Kamera DALSA 1M-28 und 800 nm Bandpassfilter aufgenommenen Schweißnaht. Die Aufnahme ist weitestgehend unbeeinflusst vom Metaldampfleuchten, das Eindringen des Laserstrahls zum Beginn, die beeinflussten Zinkbereiche, die Schmelzbadgeometrie und in einigen Teilbildern das nach unten offene Keyhole, sind deutlich zu erkennen.

Nach den mit dem RLDB808 gewonnenen Erfahrungen wurde ein Prototyp eines fasergekoppelten Beleuchtungsmoduls aufgebaut (Abbildung 5-47). Verwendet wurde eine Laserdiode der Serie SP-808 (4W @ 808nm) von Laser2000. Der Vorteil dieser Lösung ist die minimierte Optik, welche durch die Faserkopplung flexibel und platzsparend montiert werden kann. Durch die Verwendung einer Lichtleiterfaser ist die Ausleuchtung homogener.

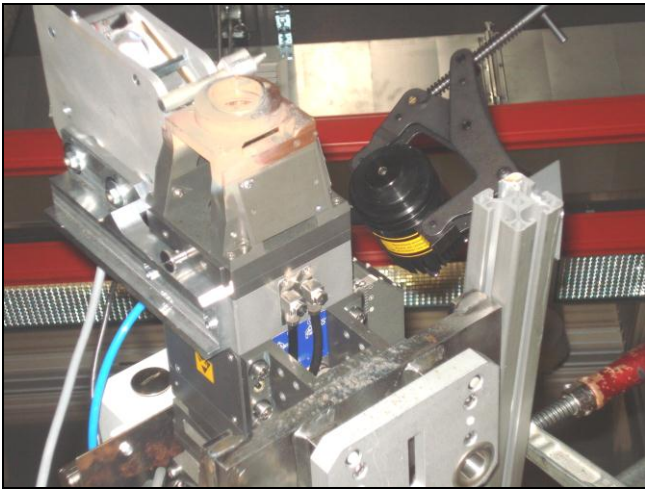


Abbildung 5-46 RLDB808-4000-5, 808 nm, 4 W, 58 x 110 mm am YW50 angebracht



Abbildung 5-47 Prototyp Beleuchtungsmodul

Dass mit der Entwicklung der Zusatzbeleuchtung der richtige Weg eingeschlagen wurde, zeigen die parallelen Entwicklungen ähnlicher Systeme für die Prozessvisualisierung, die inzwischen kommerziell verfügbar sind. Für Anwendungen in der Forschung ist dies beispielsweise das System CAVILUX® von BFi OPTiLAS, bei welchem die gepulste Laserdiodenbeleuchtung mit der Kamerabelichtungszeit bildweise synchronisiert wird. Das CPC System [45] vom Fraunhofer ILT Aachen ermöglicht eine koaxiale Beleuchtung des Laserbearbeitungsprozesses und dessen Umfelds. Neben den damit realisierten Funktionen zur Nahtführung und Prozesskontrolle ist die Messmöglichkeit der tatsächlichen Verfahrensgeschwindigkeit hervorzuheben.

Ein in der industriellen Praxis realisiertes Laserprozessüberwachungssystem mit Laserdiodenbeleuchtung und Qualitätsüberwachung durch Bildverarbeitung der hochgeschwindigkeits- Kameraaufnahmen wurde in [50] vorgestellt. Die Anwendung wurde für Schweißen von Aluminiumbauteilen mit Zusatzdraht spezifiziert.

Mit Laserdioden-Beleuchtungen im roten Wellenlängenbereich (6xx nm), wird wegen der höheren Empfindlichkeit der Kamerachips, noch weniger Beleuchtungsleistung erforderlich sein. Ein zusätzlicher Vorteil ist die dann mögliche Kombinierbarkeit der Feldbeleuchtung mit einer nachfolgenden Laserlinie gleicher Wellenlänge. Mit einer Kamera kann der Prozess beobachtet werden, die Dampfkapillare und flüssige Schmelze sind bewertbar und mit der Laserlinie kann die Oberflächentopografie der fertigen Schweißnaht, sowie der Arbeitsabstand zwischen Laseroptik und Werkstückoberfläche gemessen werden.

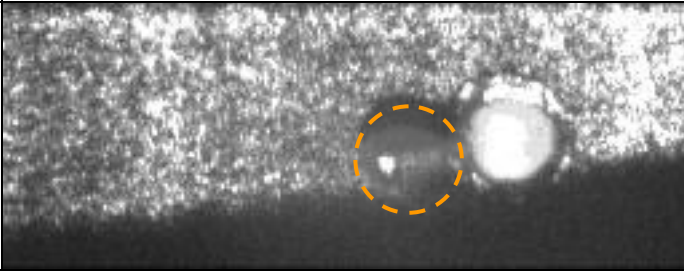
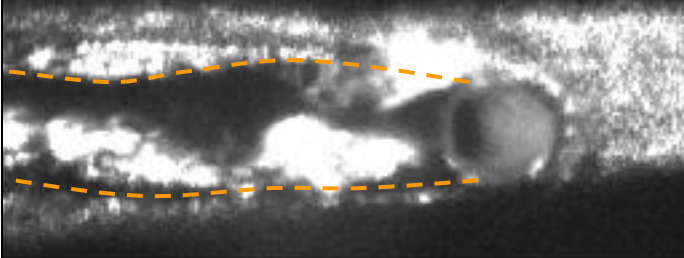
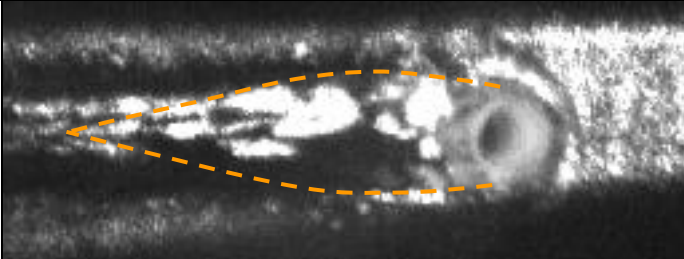
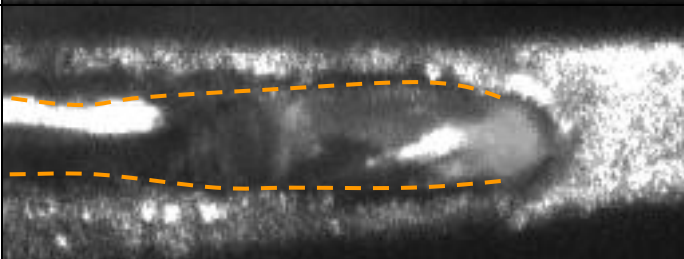
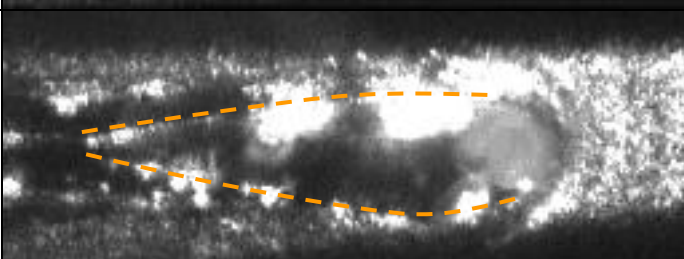
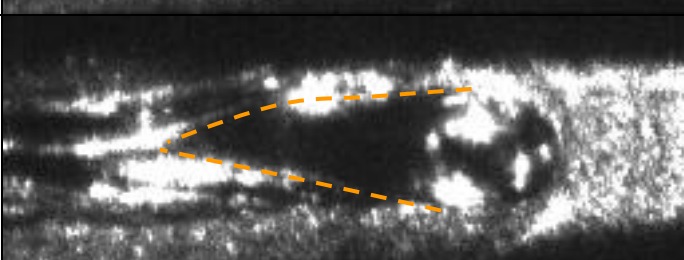
Datensatz	koaxiales Aufsichtsbild	sichtbare Merkmalsbeispiele
Bild 2 $t = 0,002 \text{ s}$ $x = 0,1 \text{ mm}$ $s \approx 0,1 \text{ mm}$		<ul style="list-style-type: none"> Schweißbeginn Einstich Oberblech „startender“ Schmelzetropfen (Spritzer)
Bild 325 $t = 0,401 \text{ s}$ $x = 20,05 \text{ mm}$ $s \approx 0,2 \text{ mm}$		<ul style="list-style-type: none"> iO-Naht durchgehende Kapillare unruhige, langgestreckte Schmelze
Bild 646 $t = 0,797 \text{ s}$ $x = 39,85 \text{ mm}$ $s \approx 0,4 \text{ mm}$		<ul style="list-style-type: none"> Nahteinfall kurzes Schmelzbad
Bild 972 $t = 1,199 \text{ s}$ $x = 59,95 \text{ mm}$ $s \approx 0,5 \text{ mm}$		<ul style="list-style-type: none"> starker Nahteinfall Metaldampf in der Kapillare langes Schmelzbad
Bild 1296 $t = 1,599 \text{ s}$ $x = 79,95 \text{ mm}$ $s \approx 0,7 \text{ mm}$		<ul style="list-style-type: none"> „falscher Freund“ Metaldampf in der Kapillare kurzes Schmelzbad
Bild 1619 $t = 1,997 \text{ s}$ $x = 99,85 \text{ mm}$ $s \approx 0,8 \text{ mm}$		<ul style="list-style-type: none"> Ende der Schweißnaht erstarrende Kapillarschmelze (Endkrater) kurzes Schmelzbad

Abbildung 5-48 Bilder einer Schweißnaht beleuchtet mit dem 4 W Diodenlasermodul RLDB808-4000; Nahtlänge 100 mm, Wannenlage, ZStE 340 Z100 1,5 mm auf DC 06 ZE 50/50 BPO 0,75 mm, $v = 50 \text{ mm/s}$, $P = 3500 \text{ W}$, ansteigender Keilspalt von $\sim 0,1$ bis $\sim 0,8 \text{ mm}$, Kamera ROI $256 \times 128 \text{ Pixel}^2$, 810,74 Bilder/s, Belichtungszeit je Bild 0,04 ms, optischer Bandpassfilter 800-40 nm

5.3.6 Koaxiale und off-axis Beobachtungen

Ziel der Untersuchungen war die Demonstration und Verdeutlichung der neu entstandenen Erkenntnisse zum Keyhole und Schmelzeverhalten. Als Störkriterium wurden ausschließlich die geometriebedingten Abweichungen der Bauteil-Fügestellen-Passungen, die sich im Schweißspaltmaß auswirken, betrachtet.

Die kontinuierliche Abbildung des Störkriteriums Schweißspalt erfolgte durch geeignete Zwischenlagen. Während der Schweißungen wurden die RTPL (Rückreflex, Temperatur, Plasma, Laser) Daten aufgezeichnet. Weiterhin wurde die Wechselwirkungszone mit zwei je 4-Watt Laserdioden-BeleuchtungsLasern von oben und seitlich beleuchtet und mit zwei Kameras Schweißlaserstrahl-koaxial und seitlich beobachtet.

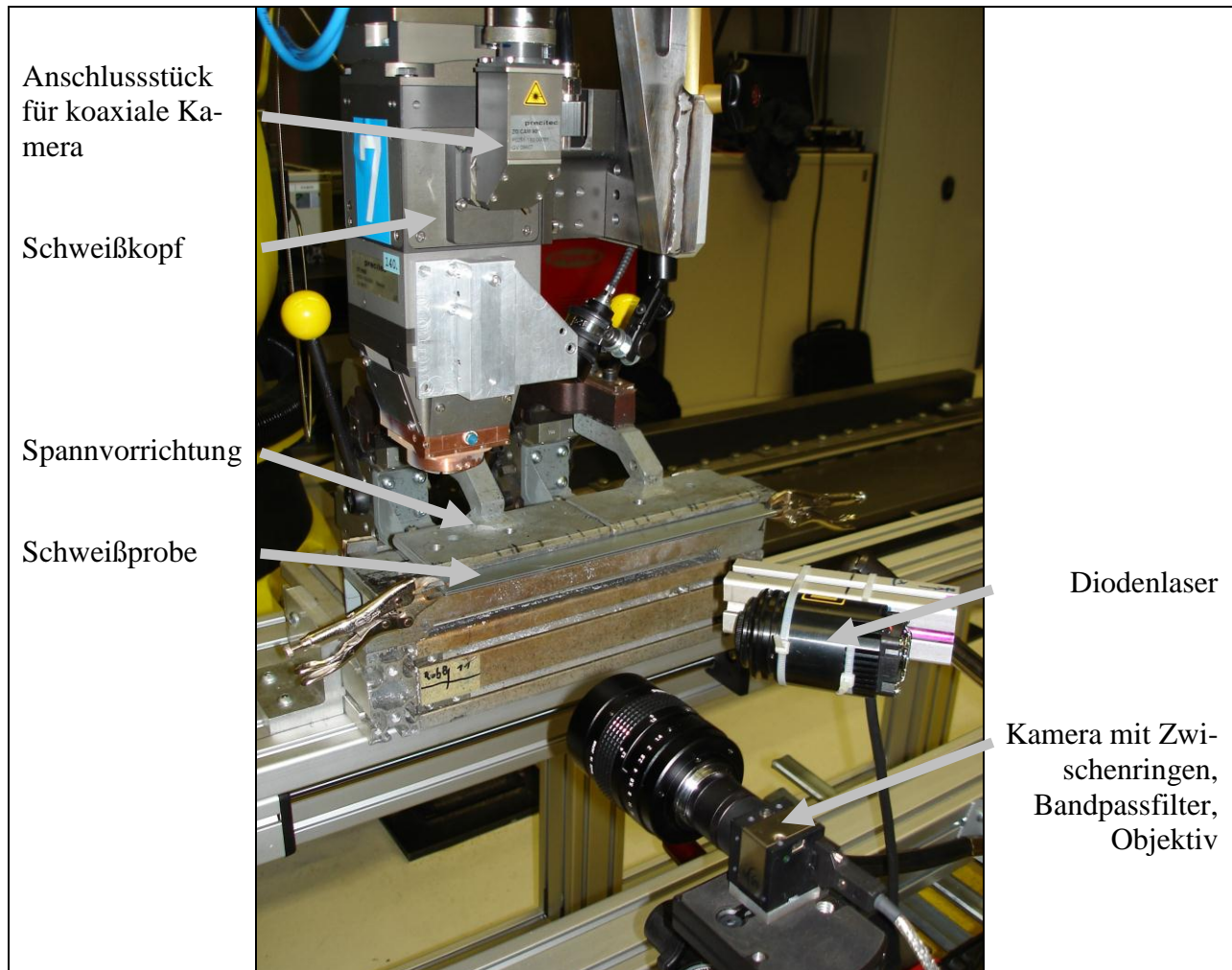


Abbildung 5-49 Versuchsaufbau

Die Abbildung 5-49 zeigt den Versuchsaufbau mit eingespannter Schweißprobe, Laserbearbeitungswerkzeug mit angebrachter Beleuchtungsoptik, der seitlichen Beleuchtung und Kamera. Das Werkzeug, die seitliche Kamera und Beleuchtung sind stationär angeordnet, die Spannvorrichtung mit den Proben wird auf dem Lineartisch durch den beobachteten Wirkbereich verfahren. Die Proben sind derart in der Vorrichtung fixiert, dass trotz der Spaltveränderung der Bearbeitungslaserfokus auf der Oberfläche des oberen Bleches lag. Außer bei einem Versuch mit DC06 wurden die Werkstoffkombinationen mit fallendem und steigendem Spalt gefügt. Die verwendeten Parametersätze der Untersuchungen sind in Tabelle 5-9 zusammengefasst. Die Angaben zur Videoaufzeichnung beziehen sich auf die koaxiale DALSA Kamera. Die seitliche

Kamera ermöglichte nur Bildraten von bis zu 60 Aufnahmen je Sekunde. Dennoch sind die Ereignisse der Schmelzenoberseite und im Blechzwischenraum hinreichend korrelierbar.

Blech oben	HX 300 LAD Z100MB; 1,54 mm dick ZStE 340 Z100; 1,5 mm dick
Blech unten	HX 300 LAD Z100MB; 1,54 mm dick ZStE 340 Z100; 1,5 mm dick (DC06 ZE 50/50 BPO; 0,75 mm dick)
Nahtlänge	260 mm
Schweißlage	Wannenlage
Laserleistung	4000 W (3000 W)
Schweißgeschwindigkeit	40 mm/s
Fokusslage	0
LWM Abtastrate	2000 Hz
LWM Signalfilter	ungefiltert und 50 Hz Tiefpass
Videobildaufzeichnung (koaxial)	332 fps
BK-Objektivblende	ganz auf
ROI	320x256 Pixel ²
Belichtungszeit	0,05 ms
Spalte	0 bis 1 mm und 1 mm bis 0

Tabelle 5-9 Parametersätze für die Nähte der Abbildung 5-50/Abbildung 5-51 und Abbildung 5-52/Abbildung 5-53

Für zwei repräsentative Schweißnähte sind im Folgenden die Datenzusammenfassungen dargestellt.

- Abbildung 5-51 und Abbildung 5-53 – steigender Spalt
- Abbildung 5-52 und Abbildung 5-53 – fallender Spalt

Von oben nach unten sind dies:

- Diagrammlegende
- Scannerbild der Nahtoberraupe
- Scannerbild der Nahtwurzel
- Diagrammbereich
 - mit linker Y-Achse für die Rückreflex (R), Temperatur (T), Plasma (P) und Laser (L) Signale in jeweiliger mm Mittelung als Spannungssignalpegel in V.
 - mit rechter Y-Achse für die nachgemessene Spaltgröße in mm (alle 10 mm gemittelt aus den Werten links und rechts der Naht)
 - mit rechter Y-Achse für die aus den koaxialen Prozessvideos gemessenen Schmelzbadlängen in mm (alle 5 mm drei bewertete und gemittelte Einzelbilder)
- Ampelfarbige äußere visuelle Bewertung der Nahteigenschaften
- Diagramm X-Achse für die Nahtlängenkoordinaten in mm
- Makroschliffbilder (nur bei steigendem Spalt)
- „innerer Befund“ der Nahteigenschaften
- Diagrammbereich mit den Standardabweichungen der je Nahtmillimeter gemittelten RTPL Pegel
- Markierung für die Längenabschnitte der Prozessvideos
- Seitliche Prozessvideos
- Koaxiale Prozessvideos

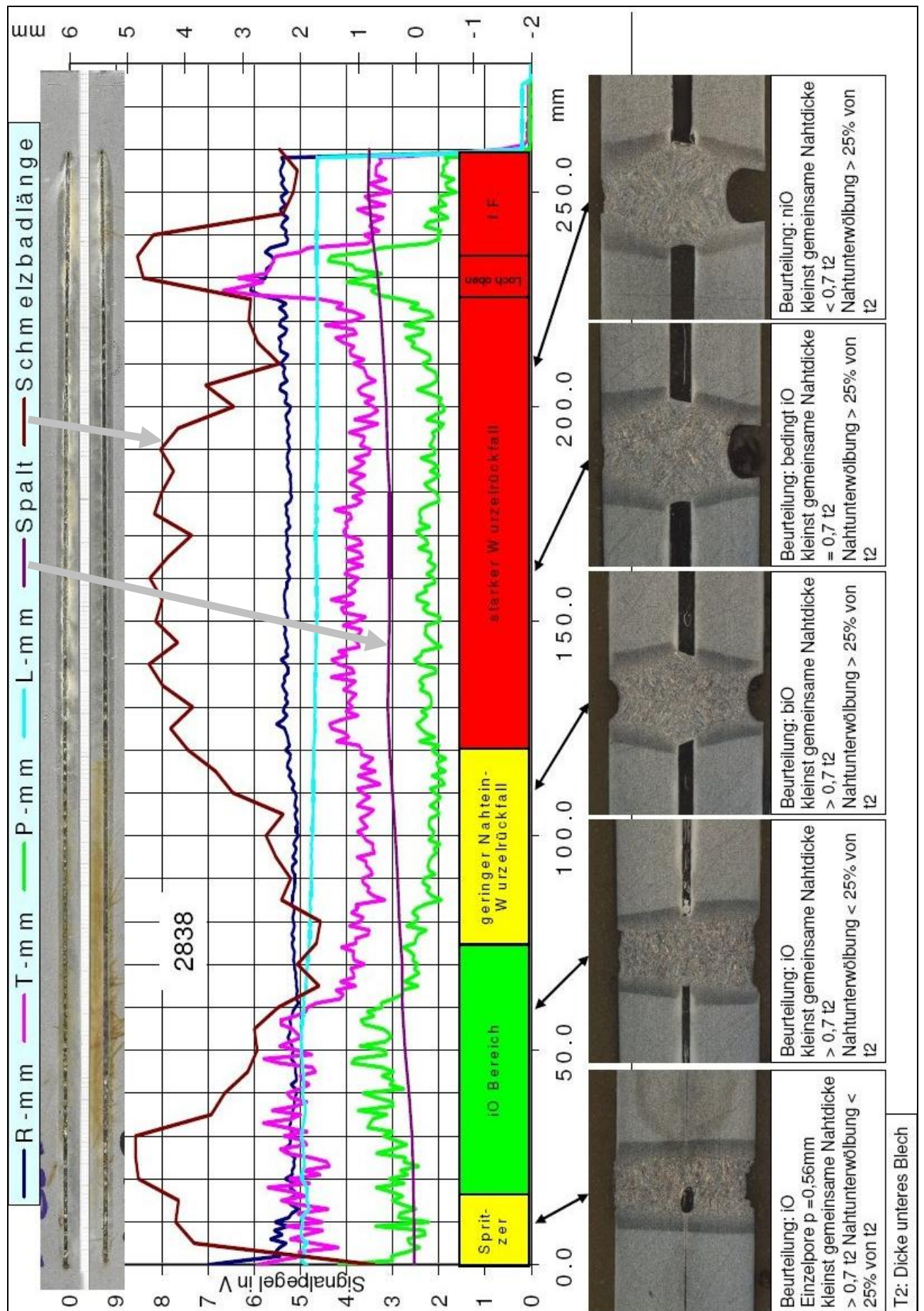


Abbildung 5-50 steigender Spalt 0 bis 1 mm, Millimeterpegel, Merkmale, Schiffe

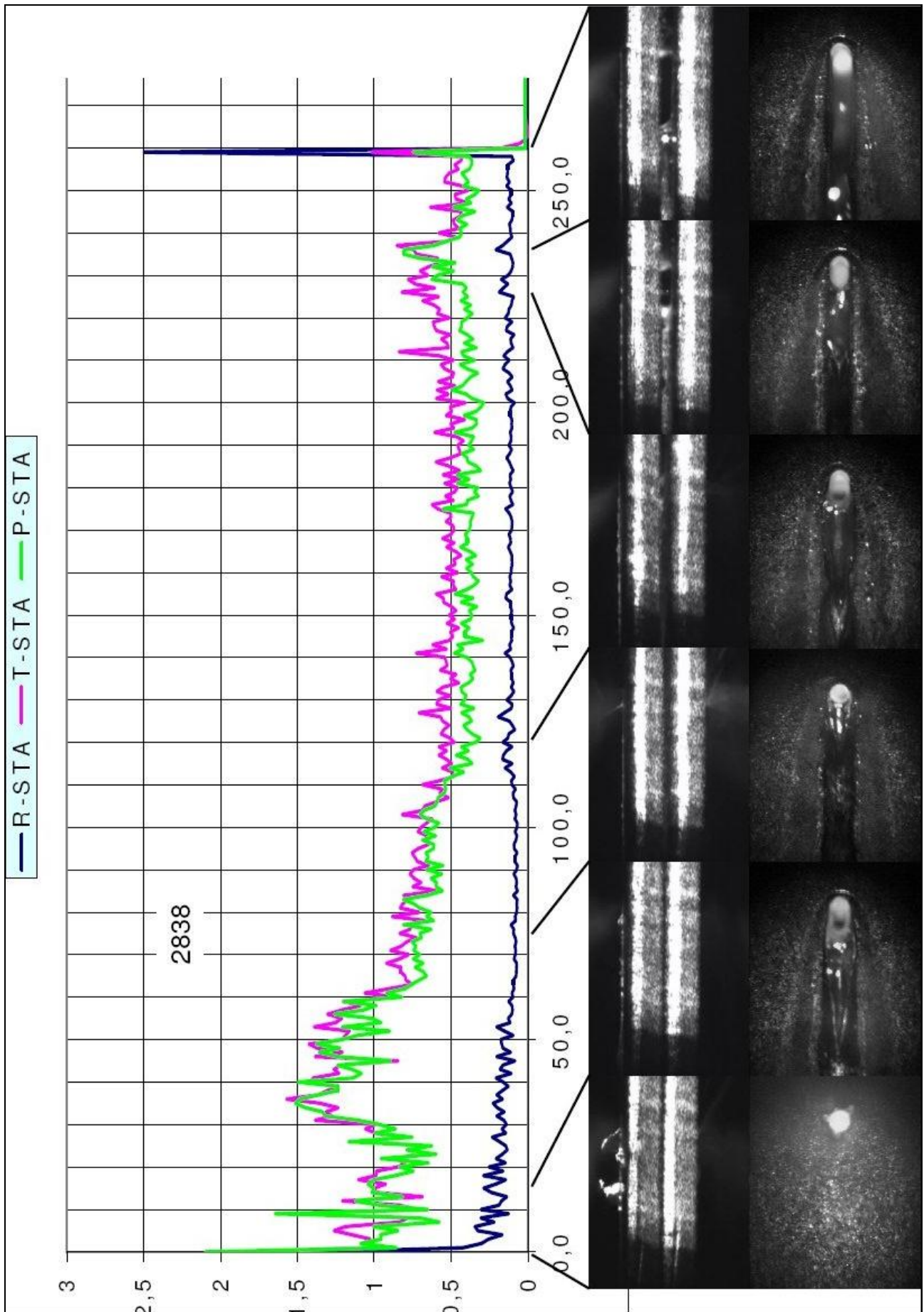


Abbildung 5-51 steigender Spalt 0 bis 1 mm, Standardabw., Prozessvideobilder

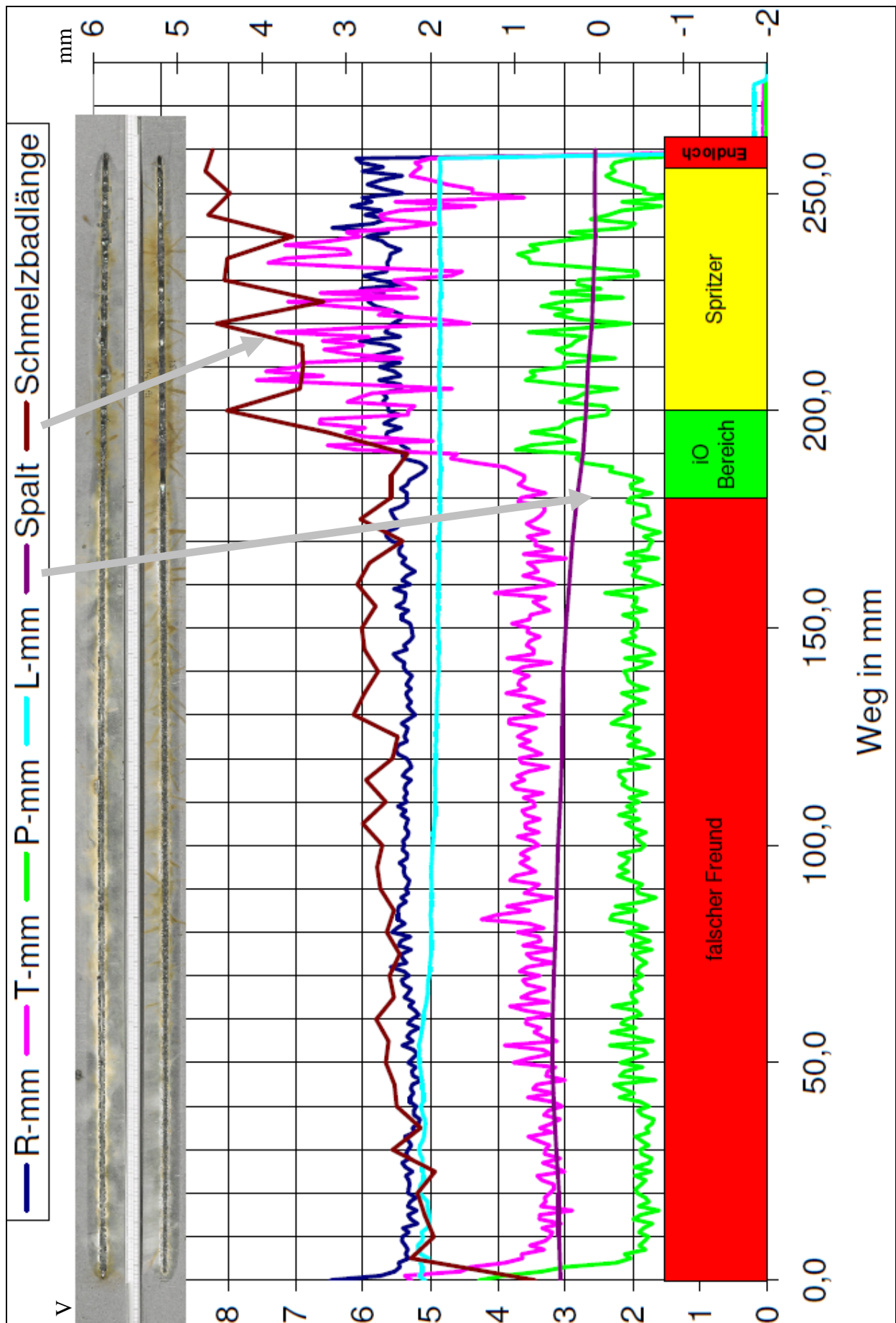


Abbildung 5-52 fallender Spalt 1 bis 0 mm, Millimeterpegel, Merkmale

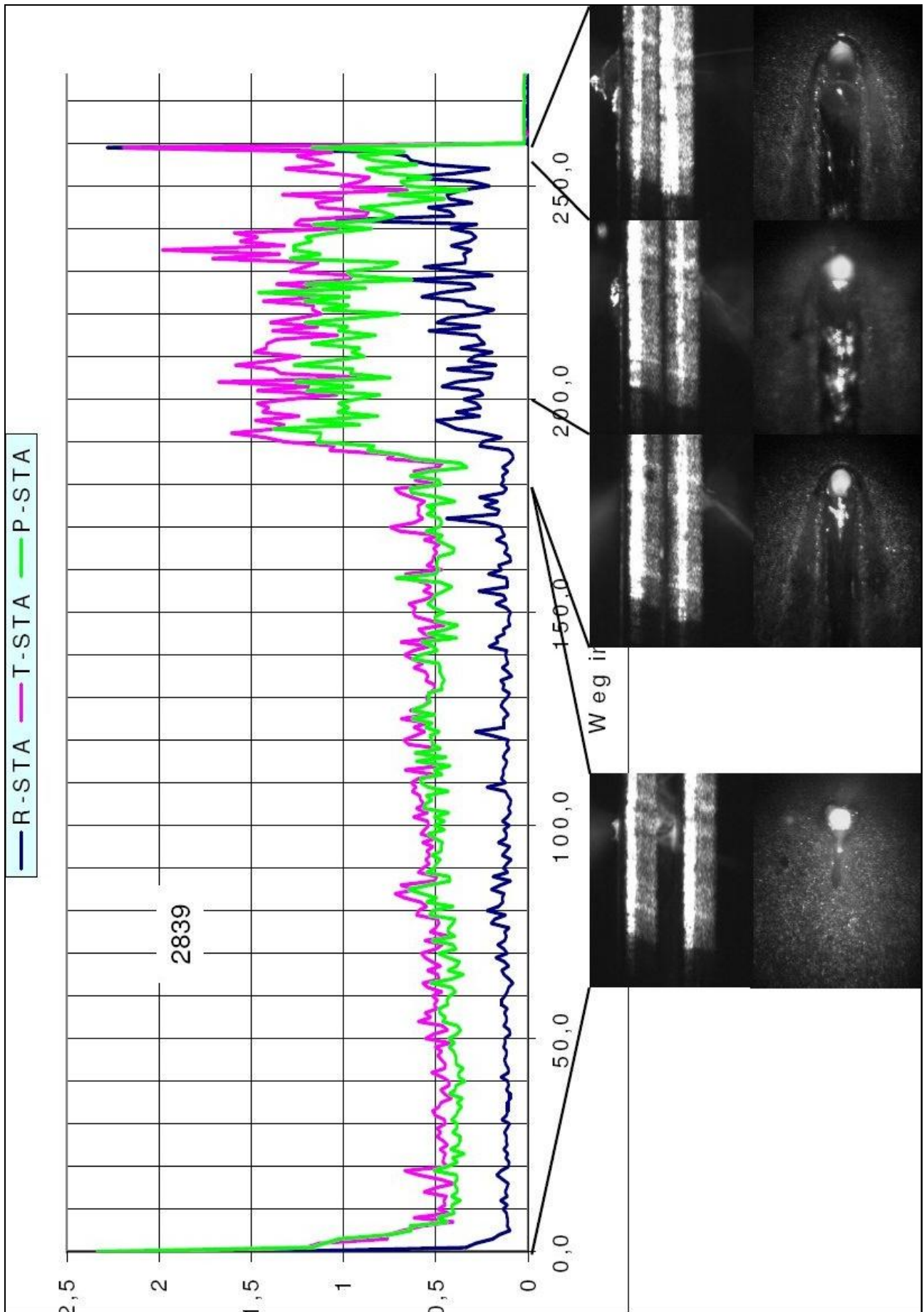


Abbildung 5-53 fallender Spalt 1 bis 0 mm, Standardabw., Prozessvideobilder

Mit den Versuchen wurden alle gewünschten bzw. ungewünschten Nahtmerkmale hergestellt. Die Datenzusammenfassungen stellen die RTP-Signale den Schweißspalten, dem oberen Schmelzenverhalten und den Ereignissen im zu schließenden Zwischenraum gegenüber. Deutlich wird nochmals die Spaltmaß-Richtungsabhängigkeit (fallend oder steigend) der erzeugten inneren und äußeren Merkmale. Das bedeutet, dass die letztendlich in der erstarrten Schweißnaht verbleibenden Merkmale nicht nur vom jeweils gewesenen Spalt abhängig sind, sondern auch von der Tendenz der bestimmenden Störgröße.

6 Nahteigenschafts-Bewertungsmethode

Die zahlreichen durchgeführten Versuchsreihen, mit systematischen, fein abgestuften Parametervariationen, Dickenkombinationen, Werkstoffkombinationen und provozierten Fehlern, belegen die Analogien und Reproduzierbarkeit der benutzten Signale und deren Zuordenbarkeit zu Nahtmerkmalen. Diese Kenntnisse und die Analyse der im LWM bestehenden Bewertungs- und Merkmal-Zuordnungsfunktionen führten zu der im Folgenden beschriebenen Nahteigenschafts-Bewertungsmethode.

Diese Nahteigenschaften sind prognostizierbar:

- Spritzer
- Naht iO
- Geringer Nahtein-, Wurzelrückfall
- starker Nahtein-, Wurzelrückfall
- Oberseite geschnitten
- Nicht verschweißt („falscher Freund“)

6.1 Vorgehensweise

Die Methode umfasst folgende Schritte:

1. Durchführen von Anlernschweißungen und Aufzeichnung der RTP-Signale und der koaxialen Prozessbeobachtung
2. Berechnung der RTP-Mittelwerte und Standardabweichungen je Nahtmillimeter (6 Wertereihen)
3. Bildverarbeitung/Ermittlung der Schmelzbadlängen aus der koaxialen Prozessbeobachtung (7. Wertereihe)
4. fachliche Einteilung der Merkmalsbereiche an den Schweißproben
5. Gegenüberstellung der Schweißprobe(n) mit den 7 Wertereihen
6. Variation der Schwellwerte für jede der 7 Wertereihen unter Beachtung der Merkmalsbereichsgrenzen (Kalibrierung), (Abbildung 6-1)
7. Überprüfung der Schwellwerte mit weiteren Schweißproben

Zur Verwendung und Auswertung der Daten werden wie bereits vorgeschlagen die Photodetektoren-Signalpegelwerte in zeitliche Gruppen oder durch Division mit der Schweißgeschwindigkeit in Wertegruppen je Naht-Längeneinheit (z.B. Werte je mm) eingeteilt. Von jeder Gruppe werden die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet.

Somit sind die Signalpegelwerte als 6 Kurven über der Nahtlänge darstellbar. (R-mm, T-mm, P-mm, R-STA, T-STA, P-STA)

Aus jedem einzelnen Kamerabild wird die Länge von der vorderen Kapillarfront bis zum Ende der flüssigen Schmelze ermittelt (Tabelle 6-3). Dieser Wert liegt in Pixeln vor und kann in Längeneinheiten umgerechnet werden. Somit gibt es eine siebente charakteristische Kurve für den durchgeführten Schweißprozess. Bei hinreichend hoher Kamera-Aufzeichnungsgeschwindigkeit kann auch die Standardabweichung der Schmelzbadlänge als achte Größe in die Auswertung einfließen. Aus den Kombinationen dieser sieben (oder acht) Werte können positionsbestimmend die Nahteigenschaften prognostiziert werden.

In Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 sind die Pegelteilungen durch je einen Schwellwert für die Rückreflex, Temperatur und Plasmawerte bei ansteigendem und abfallendem Spaltmaß dargestellt. Für die Schmelzbadlänge wurde der Grenzwert auf 3 mm festgelegt.

Bei der einfachsten Auswertungsmethode wird für jede der Signalkurven nur ein Schwellwert ermittelt. Dann liegen die aktuellen Signalwerte entweder unter (Bereich 1) oder über (Bereich

2) dem Schwellwert. Für feinere Auswertungen können auch mehrere Schwellwerte festgelegt werden.

Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 zeigen die berechneten Bewertungsergebnisse nach der beschriebenen Methode für die Laserschweißnähte aus Abbildung 5-51 und Abbildung 5-53. Die nicht bewerteten Übergangsabschnitte und geringfügigen Fehleinschätzungen sind durch Verfeinerung und ggf. Nutzung mehrerer Schwellwerte für einzelne Signalpegel oder Eigenschaftsarten minimierbar.

Eine Vielzahl der auftretenden Ereignisse und Erscheinungen der verschiedenen Prozesszustände zeigt Tabelle 6-4. Mit Hilfe der Eigenschaftsnetze in Tabelle 6-2 wird die Zuordnung der Signalpegelbereiche zu den Nahteigenschaften visualisiert.

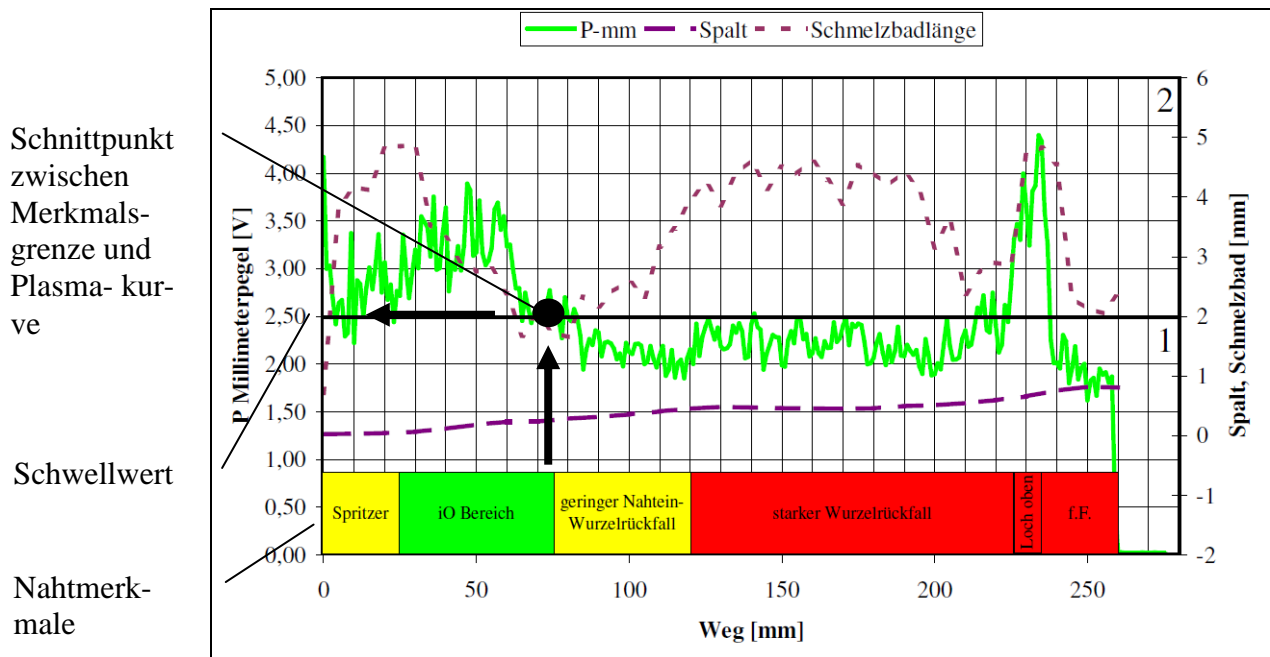


Abbildung 6-1 Beispiel für die Festlegung des Signalpegel-Schwellwertes im Plasma-Millimeterpegel (P-mm) in Abhängigkeit der vorhandenen Nahtmerkmale (Grenze zwischen iO-Bereich und geringem Nahteinfall)

Im konkreten Fall wurden die Bereichsgrenzwerte wie folgt festgelegt:

Rückreflex R-mm	Rückreflex STA R-STA	Temperatur T-mm	Temperatur STA T-STA	Plasma P-mm	Plasma STA P-STA	Schmelz- badlänge SBL
5,8 V	0,1 V	4,2 V	0,8 V	2,5 V	0,6 V	3 mm

Tabelle 6-1 Schwellwerte des Erläuterungsbeispiels

Das Merkmal Spritzer (hohe Spritzerwahrscheinlichkeit) ergibt sich beispielsweise aus der Bedingung:

R-mm < 5,8 V UND R-STA > 0,1 V UND T-mm > 4,2 V UND T-STA > 0,8 V UND P-mm > 2,5 V UND P-STA > 0,6 V UND SBL > 3 mm

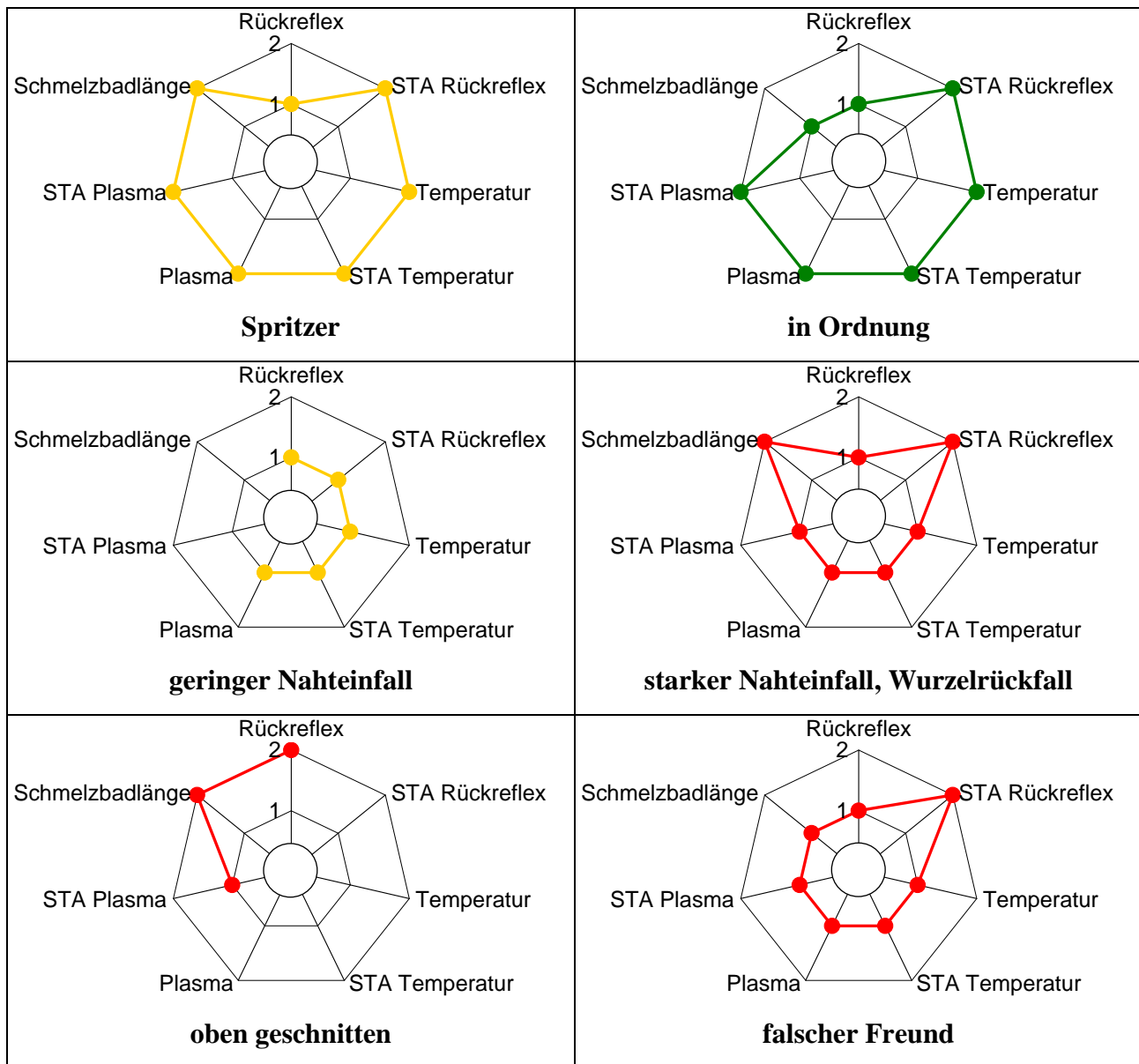


Tabelle 6-2 Eigenschaftsnetze zur Signalpegel-Eigenschaftszuordnung nach Schwellwertsbereichen

Zu beachten ist, dass für die Identifizierung nicht jedes Nahtmerkmals alle 7 Signale von Bedeutung sind. So werden für die Identifizierung des Merkmals „geringer Nahteinfall“ die Parameter Schmelzbadlänge und STA Plasma nicht benutzt, da diese in beiden Wertebereichen liegen können (unter oder über dem Schwellwert).

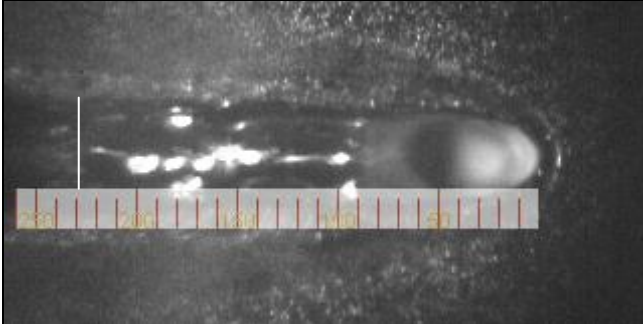
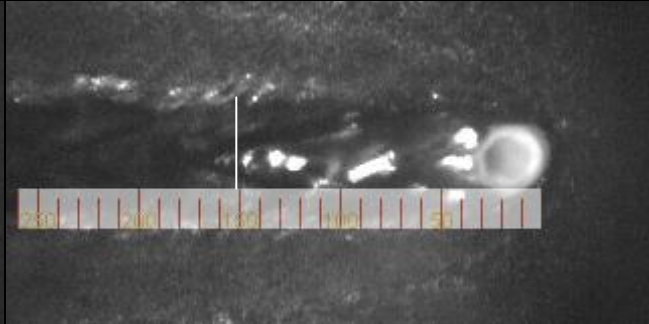
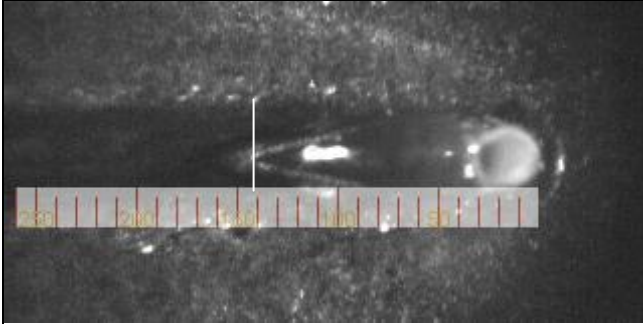
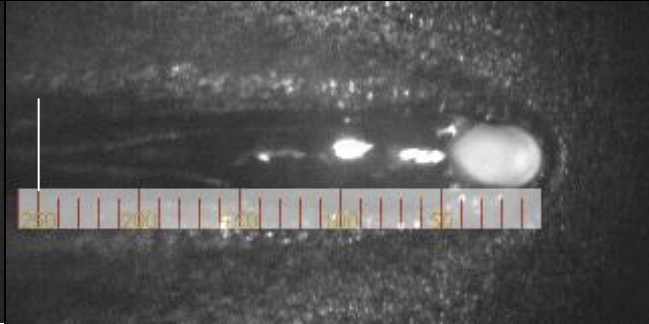
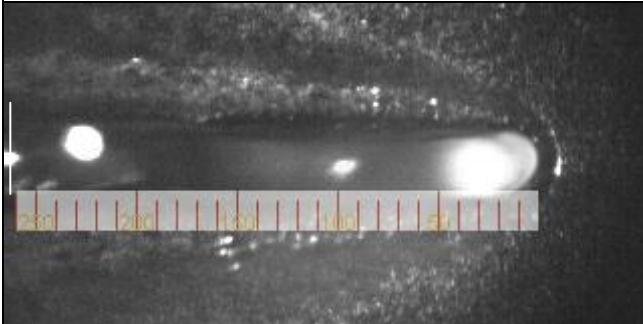
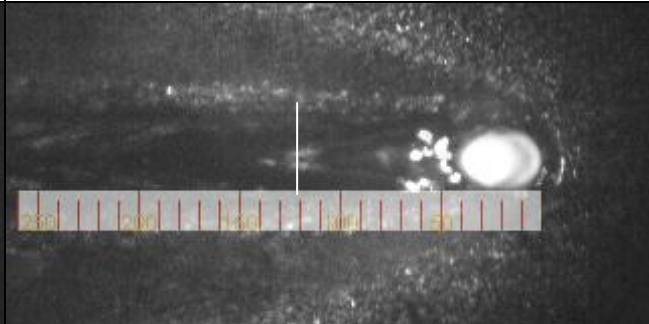
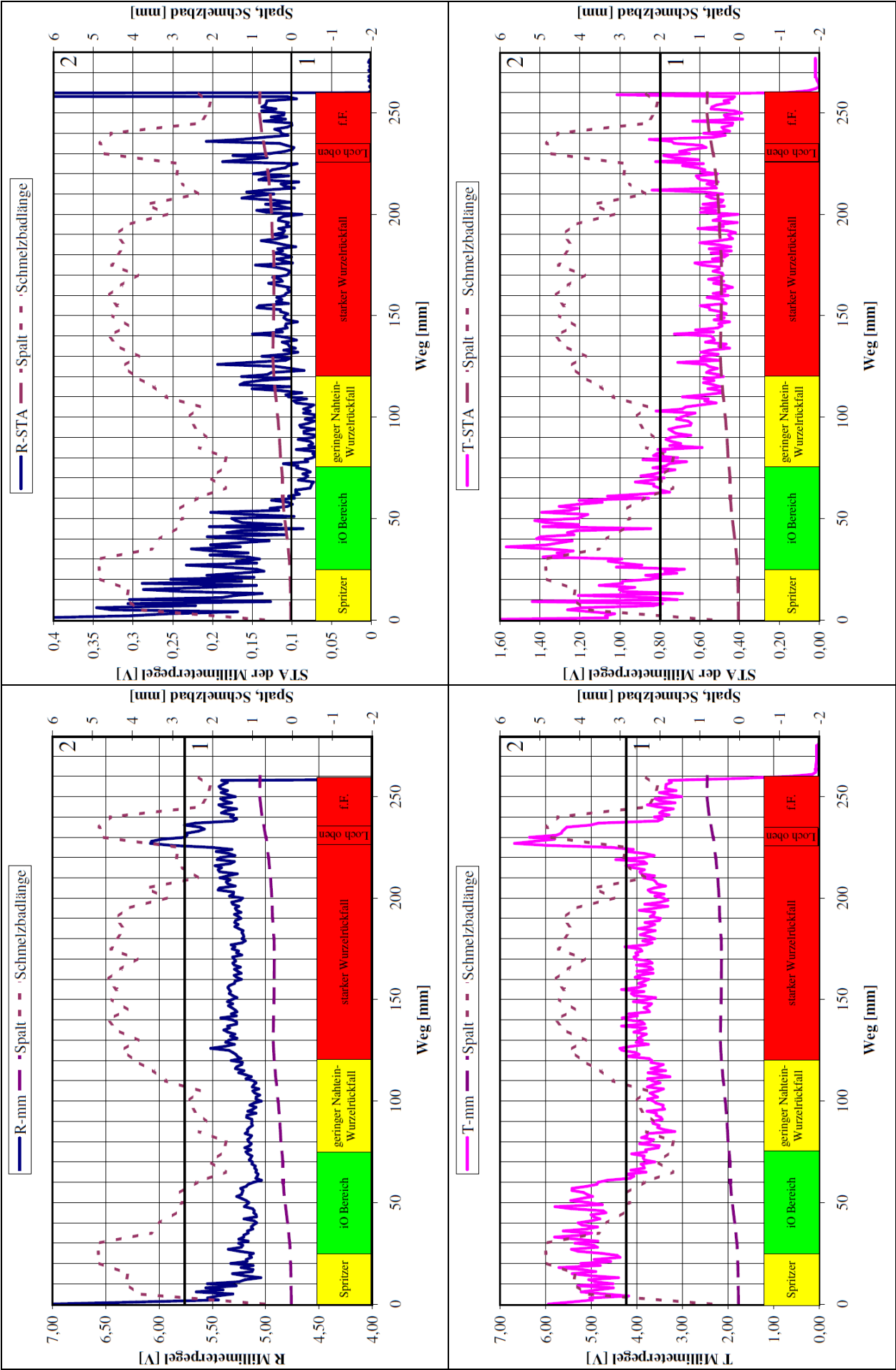
	
Position = 10 mm SBL = 4,2 mm (229 Pixel) Spritzer	Position = 50 mm SBL = 2,8 mm (151 Pixel) iO
	
Position = 100 mm SBL = 2,6 mm (143 Pixel) geringer Nahteinfall	Position = 150 mm SBL = 4,5 mm (248 Pixel) starker Nahteinfall
	
Position = 235 mm SBL = 4,8 mm (265 Pixel) oben geschnitten	Position = 250 mm SBL = 2,1 mm (117 Pixel) falscher Freund

Tabelle 6-3 Schmelzbadlänge (SBL) mit Pixelskala zur Umrechnung in mm (55 Pixel je 1 mm) der Naht aus Abbildung 5-50 und Abbildung 5-51 (Der angegebene SBL-Wert ist gemittelt mit dem Vorgänger- und Nachfolgerbild der angegebenen Position.)

	Einheit	Spritzer	iO	Geringer Nahtefall	Starker Nahtefall, Wurzelrückfall	oben geschnitten	Falscher Freund
Rückreflex	V	1	1	1	1	2	1
STA Rückreflex	V	2	2	1	2		2
Temperatur	V	2	2	1	1		1
STA Temperatur	V	2	2	1	1		1
Plasma	V	2	2	1	1		1
STA Plasma	V	2	2		1	1	1
Schmelzbadlänge	Bereich	2	1		2	2	1
Schmauch oben	braun						
Zinkoxid oben	weiß		ja	ja	ja		ja
Schmauch unten	braun		ja	ja			
Zinkoxid unten	weiß					ja	ja
Keyholeform oben		unbestimmt	rund	rund	langes Langloch	langes Langloch	kurzes Langloch (Doppelkreis)
Keyholeöffnung unten von oben sichtbar		nein	ja	ja	nein	nein	gelegentlich
Schmelzbadform		tropfenförmig lang fluktuert	tropfenförmig kurz fluktuert	tropfenförmig kurz gleichmäßig	tropfenförmig lang gleichmäßig	Kanal	tropfenförmig kurz gleichmäßig
Metalldampf oben		fluktuert	fluktuert	fluktuert	fast keiner	gleichmäßig	fluktuert
Metalldampf unten		fluktuert	fluktuert	fluktuert	fast keiner	fast keiner	fluktuert

Tabelle 6-4 Zuordnung der Ereignisse und Erscheinungen zu den entstehenden Merkmalen



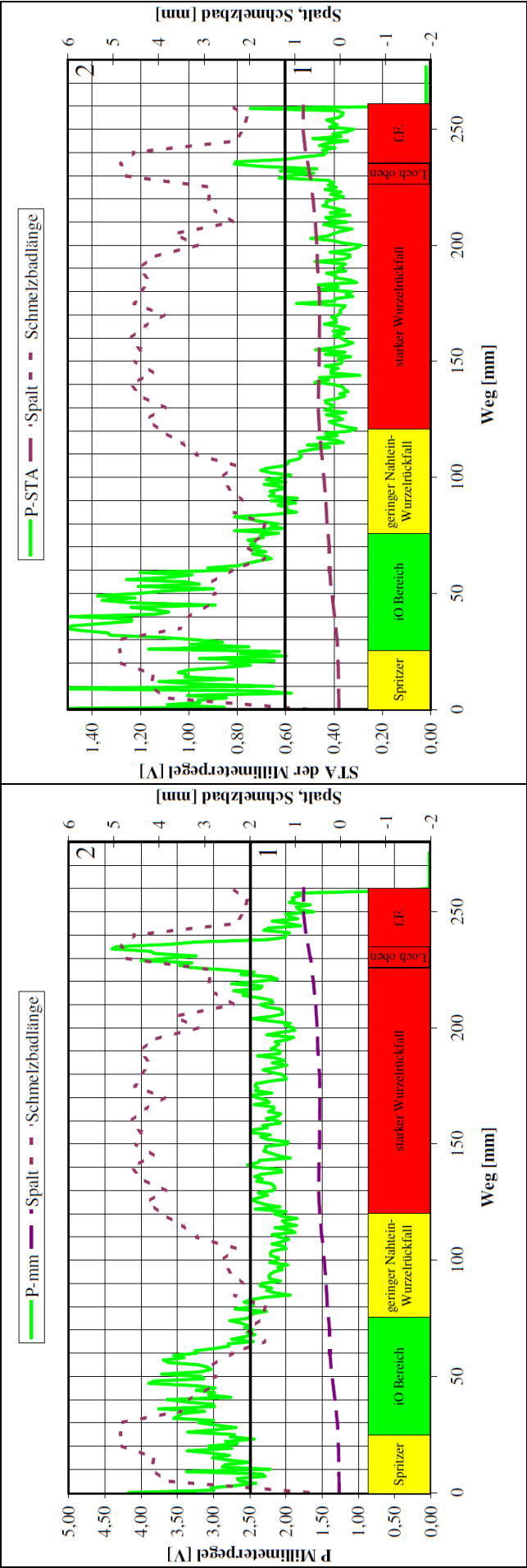


Tabelle 6-5 Bereichseinteilungen für die RTP Pegel und deren Standardabweichungen bei steigender Spaltgröße

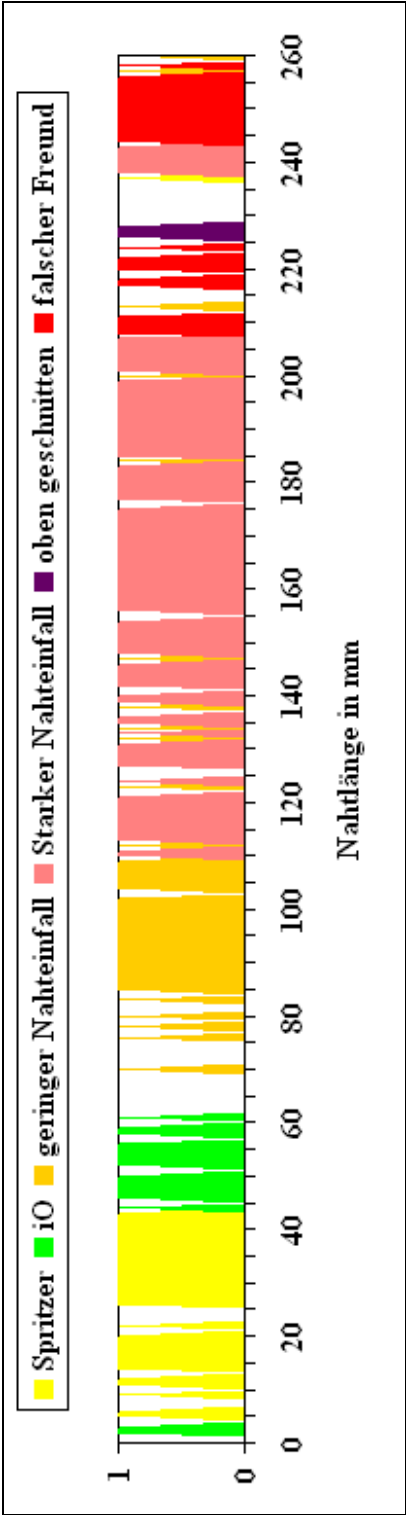
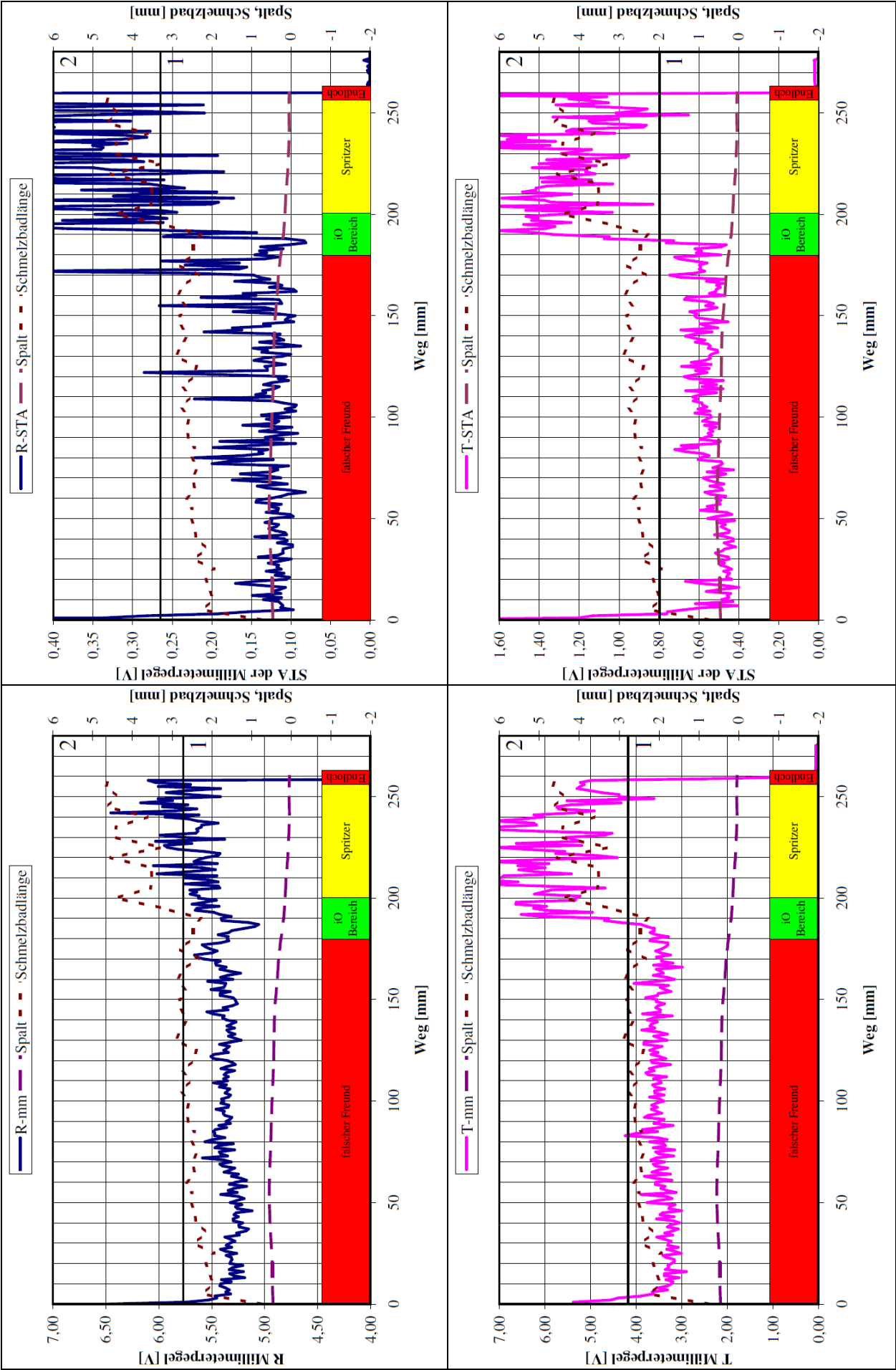


Abbildung 6-2 Aus den Inprozess Daten berechnete Nahteiigenschaften



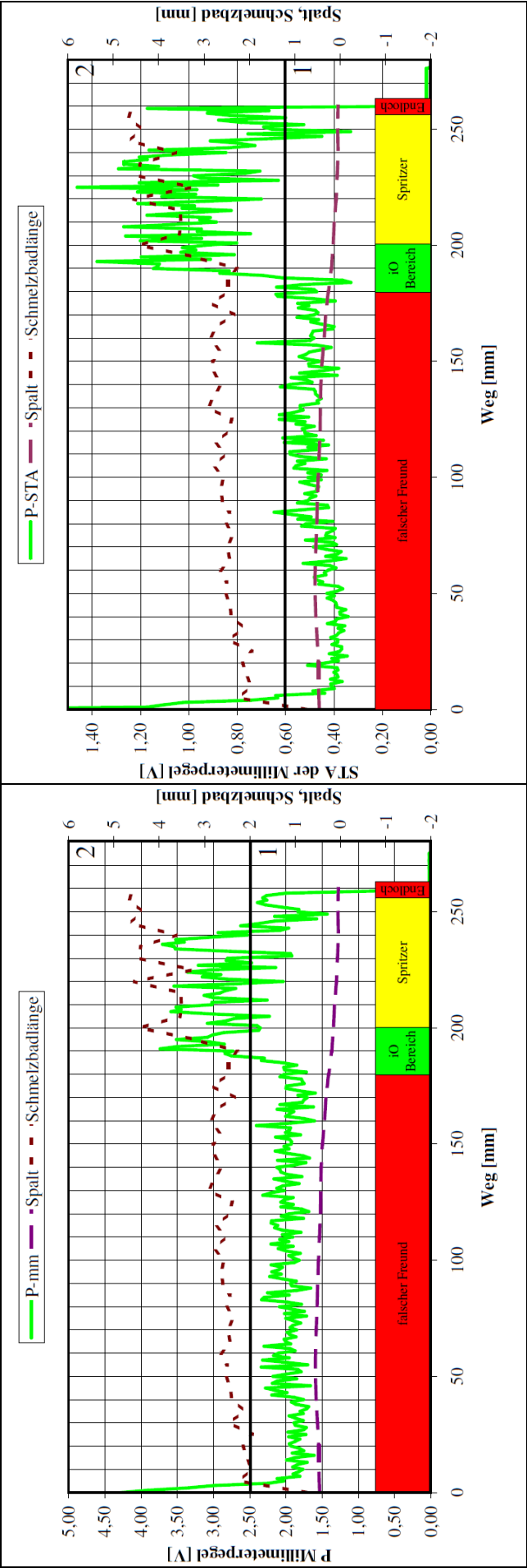


Tabelle 6-6 Bereichseinteilungen für die RTP Pegel und deren Standardabweichungen bei fallende Spaltgröße

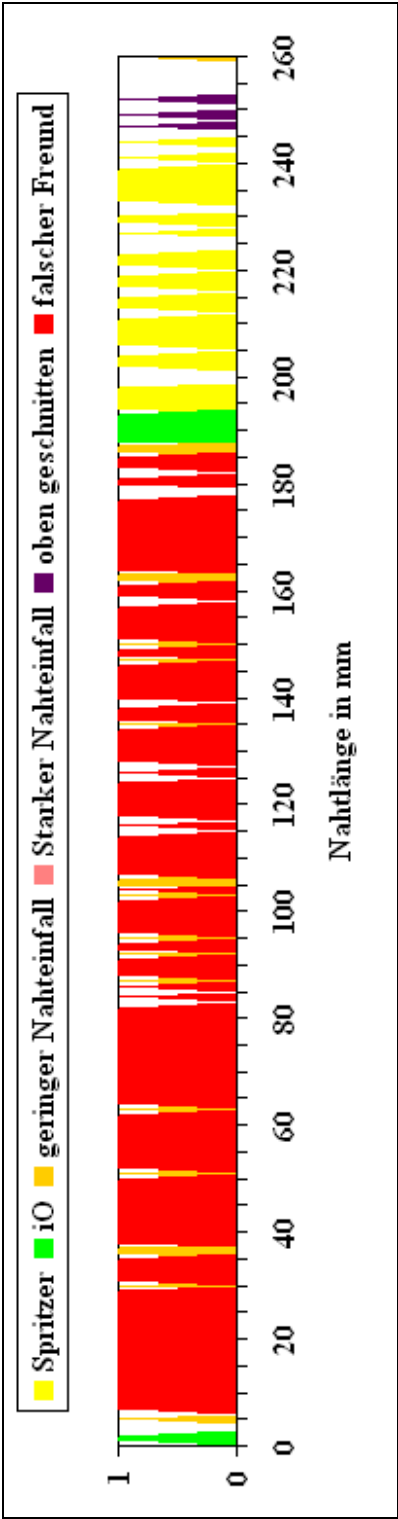


Abbildung 6-3 Aus den Inprozess Daten berechnete Nahteigenschaften

6.2 Durchgangslöcher, Poren, Endkrater

In [117] ist gefordert, dass maximal 10% der Nahtlänge diese Unregelmäßigkeiten aufweisen dürfen. Dann gilt diese Naht (für dieses Merkmal) als in Ordnung. Sind bis zu 20% der Nahtlänge derart unregelmäßig, ist diese Naht bedingt in Ordnung (biO). Ist eine Naht von einem Merkmal als biO einzustufen, darf sie kein anderes biO Merkmal aufweisen. Z. B. 11% der Nahtlänge mit Oberflächenporen und 15% der Nahtlänge Nahteinfall (Nahtunterwölbung); beide Merkmale sind jeweils biO; zusammen ist die Naht nicht in Ordnung.

Bei der visuellen Qualitätsprüfung werden die Einzellängen der verschiedenen Unregelmäßigkeiten gemessen, summiert, miteinander und zur Gesamtnahtlänge ins Verhältnis gesetzt. Die vorgestellte Methode kann diese Vorgehensweise nicht automatisiert abbilden. Es kann jedoch von einer gewissen Auftretenswahrscheinlichkeit von Durchgangslöchern und Poren im ermittelten Merkmalsbereich „Spritzer“ ausgegangen werden. Durchgangslöcher, Löcher oben oder porenähnliche Löcher können auch im Merkmalsbereich „Oben geschnitten“ vorhanden sein und ähnlich ausgewertet werden.

Ob eine exakte Angabe von einzelnen Nahtmerkmalen (Durchgangslöcher, Poren, Endkrater) mit einer derartig basierten Prozessüberwachung bzw. Auswertung überhaupt möglich ist, kann nicht abschließend beantwortet werden. Angaben der Auftretenswahrscheinlichkeit werden bei Weiterentwicklung der Methode unter Festlegung mehrere Schwellwerte und der Zuhilfenahme zusätzlicher mathematisch-statistischer Verfahren möglich sein.

6.3 Aussagesicherheit

Die vorgeschlagene Methode zur Nahteigenschaftsbewertung ist kein Prüfverfahren. Es handelt sich um eine Prozessüberwachung mit nach geschalteter, verknüpfter Bewertung der aufgezeichneten Prozessemissionen. Ein gut eingerichteter und gepflegter Fertigungsprozess kann damit nicht ersetzt werden. Sowohl der Prozess, als auch die Auswertung bedürfen stets fachlich qualifizierter Betreuung. Die Nahtmerkmal-Ergebnisaussagen sind Prognosen auf der Basis von Indizien aus dem Laserschweißprozess. Von bleibenden Aussageabweichungen zum wahren (geprüften) Ergebnis muss ausgegangen werden.

Die Sicherheit der errechneten Prognosen hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab:

- Werkstofftoleranzen der Fügepartner und deren Beschichtungen
- Werkstückbeölung und Verschmutzung
- Geometrischen Werkstücktoleranzen
- Kinematischen Anlagentoleranzen
- Allgemeinen Anlagenzustand
- Zustand des gesamten Lasersystems
- Zustand, ggf. Alterung der Sensoren
- Störfaktoren auf Datenübertragungen
- Umwelteinflüssen
- Softwarequalität
- Anlernqualität
- ...

Ein regelmäßiger Abgleich der Ergebnisse mit „echten“ zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfverfahren ist weiterhin notwendig. Insofern ist die Kombination dieser Bewertungsmethode mit einem nacheilenden Oberflächenscanner sinnvoll. Löcher, Poren, Endkrater, Nahteinfall oder Überhöhung und ggf. die Nahtbreite sind so mit realen Zahlenwerten belegbar. Innere Poren und Risse sind nur mit durchstrahlenden Prüfungen oder metallurgischen Schliffen auffindbar.

Die Aussagesicherheit der Bewertungsmethode kann auf Basis der Beispielschweißungen (Ergebnisdiagramme Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 unten) in 3 Arten unterteilt werden, die in etwa folgende Abweichungen zu den geprüften Nahtergebnissen haben:

		Sicherheit
1.	keine Aussage	5% - 10%
2.	falsche Aussage	5% - 10%
3.	verschobene Merkmalsgrenze	10% - 15%

Tabelle 6-7 Abgeschätzte Aussagesicherheiten

Die Trägheit der Schmelze(n), die Geschwindigkeit von Signaländerungen und deren Übergangsverhalten an den Merkmalsgrenzen sind Ursachen der Prognoseabweichungen. Erfreulich gut ist die Abgrenzung zwischen geringem und starkem Nahteinfall, die ohne konkrete Maßfestlegung der visuell-fachlichen Einschätzung sehr nahe kommt.

Die Festlegung weiterer Schwellwerte für die einzelnen der 7 Datenreihen, ggf. die zusätzliche Nutzung der Standardabweichung der Schmelzbadlänge wird die Aussagesicherheit noch mehr verbessern. Auch können kleinere oder größere Längenabschnitte für die Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen verbessernd wirken.

Für die zusätzliche Berücksichtigung von Trends der Signaländerungen bei der Merkmalsanalyse sind das Nahtanfangsmerkmal und die Richtung und Stärke der Spaltänderung wichtig. Für Spaltänderungen von ca. bis zu $\pm 0,1$ mm je 5 mm Nahtlänge zeigt Abbildung 6-4 die möglichen Merkmalsübergänge. Bei schnellen Spaltänderungen auf kurzen Nahtlängen muss sich in der erstarrenden Schmelze nicht jedes Merkmal zwangsläufig ausbilden. In diesem Fall sind weitere Merkmalsübergänge möglich (z. B. direkt von „Starker Nahteinfall“ zu „In Ordnung“).

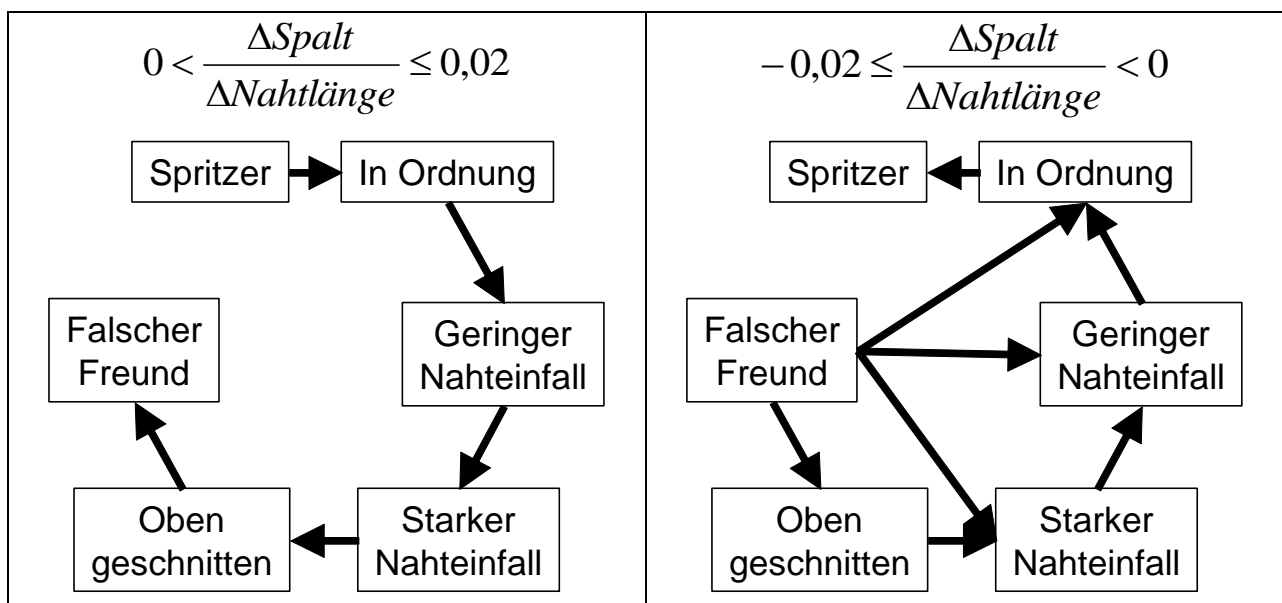


Abbildung 6-4 Merkmalsübergänge in Abhängigkeit von Spaltänderungen

7 Modellbildung

Abbildung 7-1 verdeutlicht vereinfacht die Erweiterung der bestehenden Laserstrahl – Werkstoff – Wechselwirkungsmodelle (Abbildung 2-22) für das Laserstrahlschweißen. Zum Verständnis der Prozessemissionen und der entstehenden Nahtmerkmale ist die Betrachtung der Interaktionen zwischen Laserstrahl, 1. Blech, Spalt, 2. Blech, Zinkschichten, Schmelzenflüssen und der Schmelzenvereinigung bedeutsam. Die beobachteten Phänomene der Merkmalsausprägung der Laserstrahlschweißnähte und der durch die Prozessbeobachtung aufgenommenen Erscheinungen werden mit Hilfe der Abbildung 7-3 bis Abbildung 7-13 interpretiert. Die Abbildungen ergänzen und erweitern die in der Laserschweißtechnik bekannten Einschweißmodelle für die Dampfkapillare beim Tiefschweißen [51] S. 257, [52] S.5 u. ä. In [53] und [54] sind Betrachtungen zur Dampfkapillare beim Überlappschweißen dargestellt und mit Aufsicht-Prozessvideobildern und metallurgischen Schliffbildern korreliert. Zu diesen Bildern sind schematische Schnittmodelle durch die Strahlachs- und Naht-Längsebene skizziert. In den herkömmlichen Schnittdarstellungen sind bereits ab der Schmelzenfront die Einzelschmelzen vom oberen und unteren Blech miteinander verlaufen dargestellt. Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen für Bleche mit verzinkter Oberfläche ein anderes Verhalten.

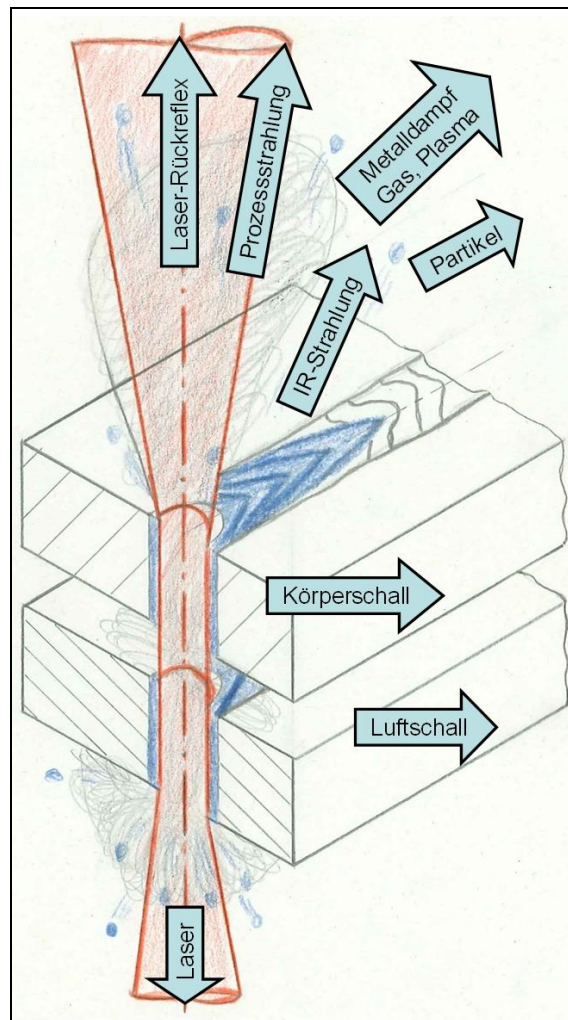


Abbildung 7-1 Skizze der Laserstrahl - Blech - Spalt - Blech – Wechselwirkungszone bei Überlappschweißen

7.1 Anfang und Ende der Schweißnaht

Laseranlageseitig ist der Anfang und das Ende der Schweißnaht durch das An- und Abschalten der Laserleistung zwischen AUS und dem programmierten Sollwert gekennzeichnet. Es ist ein technisches Zeit-Leistungs-Verhalten gegeben; mit programmierten Zeit-Leistungs-Rampen kann der An- und Abschaltvorgang gezielt gesteuert werden. Im Normalfall soll beim Anschalten schnellstmöglich die gewünschte Sollleistung erreicht werden. Beim Abschalten werden zur Minimierung von Endkratern oftmals spezielle Abrampkurven programmiert.

Der Beginn einer Schweißung ist in Abbildung 5-41 seitlich und in Abbildung 5-48 in der koaxialen Aufsicht gut zu erkennen. Ab dem Einwirken der Laserstrahlung beginnt die Wechselwirkung mit dem Werkstoff an der Oberfläche bis sich die Dampfkapillare ausprägt. In Abhängigkeit der Werkstoffsorte, der Beschichtung und der Oberflächenbeschaffenheit wird für einen kurzen Zeitabschnitt relativ viel Laserleistung reflektiert. In dieser Zeit ist die Plasma- und Temperaturstrahlung noch sehr gering.

Mit der weiteren Ausprägung der Dampfkapillare reduziert sich die reflektierte Laserleistung. Gleichzeitig steigt durch die absorbierte Energie die Temperatur um die Wechselwirkungsstelle; die Menge und der Energiegehalt des Metaldampfes steigen an. Dementsprechend steigen die von den Temperatur- und Plasmadetektoren empfangenen Strahlungswerte.

Bei der vorgeschlagenen Nahteigenschafts-Bewertungsmethode und für die weitere Modellbildung sollen die unsteten, kurzzeitigen Ein- und Abschwingeffekte am Anfang und zum Ende der Schweißnähte nicht betrachtet werden. Für eine automatisierte Auswertung sind die Daten dieser Nahtabschnitte in geeigneter Länge zu unterdrücken.

7.2 Nahtmerkmal „Spritzer“ (0-Spaltschweißen)

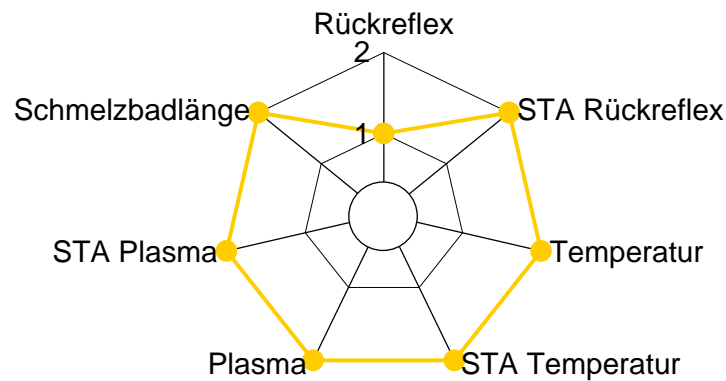


Abbildung 7-2 Nahtmerkmal „Spritzer“ - Zuordnung der Inprozessgrößen

Der Prozesszustand 0-Spalt (Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3) ist gekennzeichnet durch die behinderte Zinkentgasung und verursacht die Nahtunregelmäßigkeit „Spritzer“. Die sich im Wärmeeinflussbereich des Lasers ausbildende Zinkschmelze und der Zinkmetалldampf bauen zwischen den Fügepartnern einen erhöhten Druck auf. Dieser Druck kann sich hauptsächlich nur in Richtung der Dampfkapillare entspannen. Der in Schweißbewegungsrichtung vor dem Prozess verdampfende Zinkdampf (8) expandiert mit hoher Geschwindigkeit durch die Front der Dampfkapillare, durch die Dampfkapillare selbst und trifft auf deren Rückseite. Beim Durchströmen der Kapillarfrontseite wird aufgeschmolzenes Grundmaterial (Stahl) mitgerissen (9). Dieser Material-Massenstrom behindert das Zusammenlaufen der Schmelzen des oberen (10) und des unteren (11) Bleches an der Kapillarfront. Die Vereinigung der Schmelzen findet links und rechts der Kapillare (13) oder erst an der Schmelzenrückseite statt.

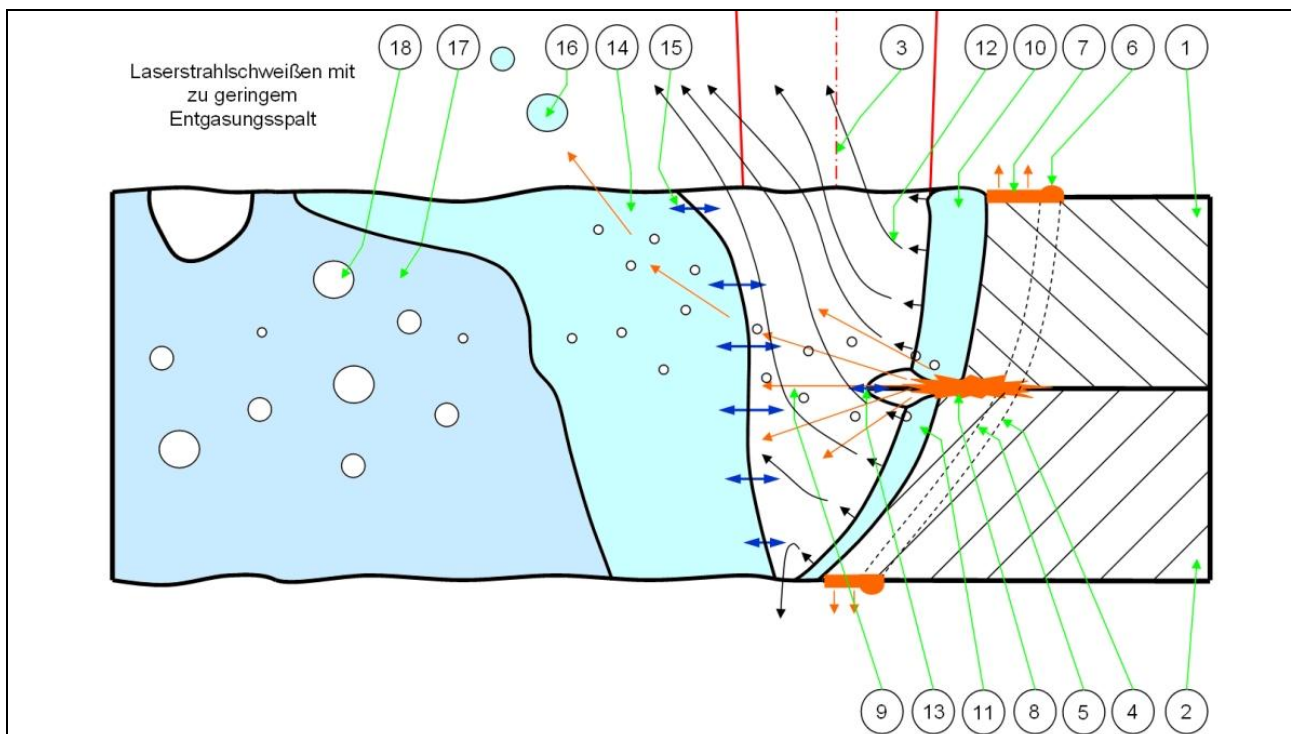


Abbildung 7-3 „Spritzer“ (0-Spaltschweißen)

1. oberes Blech (Werkstück bzw. Bauteil)
2. unteres Blech (Werkstück bzw. Bauteil)
3. Laserstrahlachse
4. 419,58 °C
5. 907 °C
6. verflüssigte Zinkbeschichtung
7. verdampfende Zinkbeschichtung
8. unter Druck stehender Zinkdampf
9. schnell strömender (expandierender) Zinkdampf und mitgerissene Stahlschmelze
10. Stahlschmelzenfront des oberen Bleches
11. Stahlschmelzenfront des unteren Bleches
12. durch die Kapillare abströmender (Stahl-)Metалldampf
13. Vereinigungspunkt der oberen und unteren Schmelzen
14. Vereinigte Schmelze
15. Bewegung der hinteren Kapillarwand
16. Metallspritzer
17. erstarrte Schweißnaht
18. Poren in der Schweißnaht

Beim 0-Spaltschweißen stellt sich kein stabiler Prozesszustand ein. Die starken und turbulenten Gasströmungen bewirken abrupte Änderungen der Kapillargeometrie und eine sehr unruhige Schmelze. Der unruhige Prozess in und um die Wechselwirkungszone spiegelt sich auch in den Signalen der Photodioden wieder (Tabelle 6-2 - Spritzer).

Nach [55] repräsentiert das Signal des Plasma (P) Sensors den Zustand des Metалldampfes, das Rückreflex (R) Signal den der Kapillare und das Temperatur (T) Signal die Beschaffenheit der Schmelze. Durch die Fokussieroptik des Laser-Arbeitsstrahls, einen Teilerspiegel und weitere spezielle optische Bauelemente (Abbildung 5-4) werden die zu observierenden Abschnitte (Abbildung 5-6) auf den Sensoren abgebildet. Vor dem Temperatursensor ist eine negative Blende angeordnet. Diese gewährleistet, dass nur die Umgebung der Kapillare auf dem Sensor abgebildet wird und der Einfluss des Metалldampfes unberücksichtigt bleibt. Durch die Art der Abbildung der Prozessereignisse auf den Sensorflächen wird eine vermittelnde Datenerfassung erreicht.

SBL	Der quer durch die Kapillare und damit den Laserarbeitsstrahl bewegte Massenstrom absorbiert und reflektiert einen Teil der Laserleistung. Dies führt zu verminderter Einschweißtiefe bzw. ungenügender Durchschweißung des unteren Bleches (schmale und ungleichmäßig ausgeprägte Nahtwurzel). Weiterhin wirkt der Material- und Energietransport auf die Schmelze (14) ab der Rückwand (15) der Kapillare und verschiebt diese entgegen der Schweißbewegungsrichtung. Dabei kommt es zum teilweisen Ausblasen der Schmelze, was zu Spritzern (16) führt. Kavitation in der Schmelze verursacht Poren (18) in der Schweißnaht nach der Erstarrung. Die verminderte Durchschweißung sowie der zusätzliche Energieeintrag in die hintere Schmelze (14) bewirken ein sichtbar langes Schmelzbad an der Schweißnahtoberseite.
R	Das Rückreflex (R) Signal hängt von der Geometrie (dem Schachtverhältnis) und den Reflexionseigenschaften in der Kapillare ab. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass mit zunehmendem Verhältnis von Einschweißtiefe zum Fokusedurchmesser die Absorption der Laserstrahlung durch Vielfachreflexion in der Kapillare ansteigt. [41] Dieser Zusammenhang gilt im klassischen Einschweißversuch und beim Schweißen von spaltfreien Stumpfstoßen in homogenen Materialien uneingeschränkt. Die aufgewendete Primärstrahlung und die aus der Kapillare reflektierte Strahlung

	werden im Metaldampf über der Werkstückoberfläche und in der Kapillare absorbiert und gestreut. Die Dämpfungswirkung auf die Laserstrahlung und die reflektierte Laserstrahlung hängt von der optisch wirksamen Länge der Metaldampfwolke [55], deren Dichteverteilung und Partikelbeschaffenheit ab.
R-STA	<p>Es bildet sich kein stationärer stabiler Prozesszustand aus. Zwar kann in den durchgeführten Untersuchungen kein Kollaps der Kapillare im oberen Blech beobachtet werden, wahrscheinlich tritt dieser jedoch im unteren Blech auf und ist für die unregelmäßigen Durchschweißungen mit verantwortlich. Die Zinkdampfmassenströme und davon mitgerissenen Grundwerkstoff-Schmelzpartikel absorbieren und streuen die Laserstrahlung zusätzlich stochastisch. Auch die unstete Form der Kapillare und deren verschiebbare Rückseite sorgen für stark dynamische Änderungen der reflektierten Laserleistung.</p> <p>Insofern ist beim 0-Spaltschweißen die Signalfuktuation der höher zu wichtende Anteil gegenüber den absoluten Pegelwerten.</p>
T	Die große Schmelzbadfläche und deren Temperatur an der Nahtoberseite sind Ursache für das hohe Niveau des Temperatur (T) Signals.
T-STA	Der hohe Grad der Schmelzendynamik bewirkt die große Änderungsspanne des Temperatursignals.
P	Auf Grund der geringeren Durchschweißung und des nicht vorhandenen Spaltes zwischen den Blechen tritt ein größerer Anteil des Metaldampfes nach oben durch die erweiterte Kapillare aus. Die elektromagnetischen Emissionen aus dem Metaldampf-massenstrom zeigen sich im Plasma (P) Signalpegel.
P-STA	Der hohe Grad der Kapillardynamik, des austretenden Metaldampfes und dessen variierende Strömungsrichtungen bewirken die große Änderungsspanne.

7.3 Nahtmerkmal „In Ordnung“

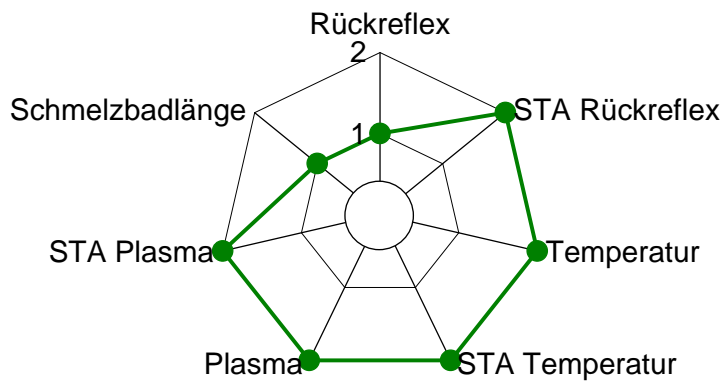


Abbildung 7-4 Nahtmerkmal „In Ordnung“ - Zuordnung der Inprozessgrößen

In Abbildung 7-6 und Abbildung 7-5 ist dieser – allgemein angestrebte – Prozesszustand in der Zuordnung der Inprozessgrößen und im vertikalen Längsschnitt skizziert. Praktisch stellt sich dieser Zustand nur als eine sehr schmale Übergangszone zwischen 0 bzw. zu wenig Spalt und zu viel Spalt dar. In Laborversuchen sind bei exakter Spalteinstellung ab 0,05 mm bis zu 0,2...0,3 mm als optimal anzusehende Schweißnähte erzeugbar. Die untere Grenze hängt von der noch tolerierten Spritzer und Auswurf bedingten Nahtunregelmäßigkeit ab. Die obere Grenze bedeutet einen minder oder mehr großen Nahteinfall und damit einen einhergehenden verminderten Anbindungsquerschnitt. Ein stabiler Prozesszustand kann sich bei konstantem Spalt einstellen und spritzer- und einfallfreie Nähte entstehen.

Der Zinkdampfmassenstrom verteilt sich im Spalt zwischen den Blechen, kann aber auch durch die Kapillare entweichen. Beim Eintritt in die Kapillare an deren Frontseite muss der Zinkdampf nun nicht die Stahlschmelze durchdringen. Die Schmelzen beider Bleche sind dort noch separiert und vereinigen sich erst im Laufe der Umströmung der Kapillare am Punkt (13). Die Laserstrahlung wird wenig durch Zinkdampf, mitgerissene Schmelzenpartikel und Schmelzeneinbrüche absorbiert. Die Kapillare bleibt stabiler ausgeprägt, vertieft sich bzw. erreicht in der Tiefe größere Querschnitte. Es wird deutlicher stärker durchgeschweißt und der transmittierte Leistungsanteil ist hoch. Der gesamte Energieeintrag in beide Bleche ist geringer. Ein Beleg für diesen Effekt sind die stärkeren braunen Schmauchablagerungen an der Unterseite.

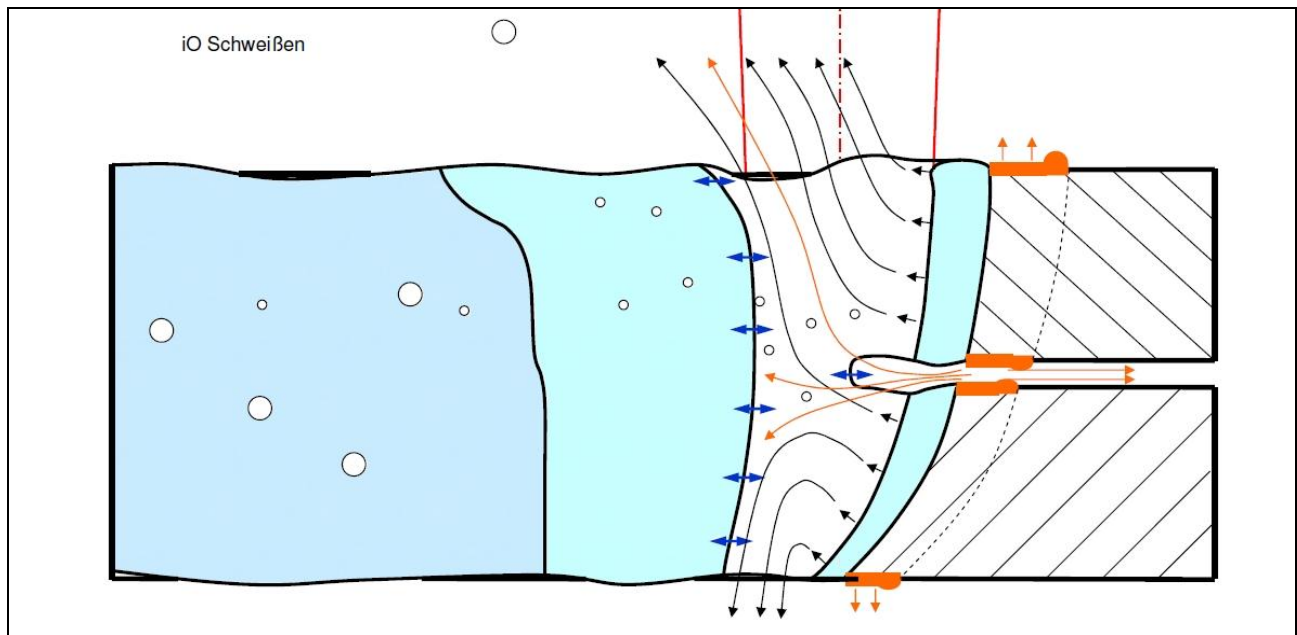


Abbildung 7-5 „iO-Bereich“

SBL	Mit größer werdenden Spalt wird der Prozess weniger gestört und durch diese Ruhe steigt bei Durchschweißung der Laserenergie-Transmissionsgrad an. Dies ist die Ursache für die kürzer werdende Schmelzbadlänge gegenüber dem 0-Spaltschweißen.
R	Das (R) Signal liegt auf geringem Niveau. Bedingt durch die verminderten Störungen der Kapillar und Schmelzenflussausprägung bewirkt die deutlichere Durchschweißung die reduzierte Reflexion der Laserstrahlung.
R-STA	Die schmale Übergangszone spiegelt sich in der Signalcharakteristik wieder. Die Standardabweichung des Rückreflex-Signals sinkt mit sich verbessernder Prozessruhe bzw. steigenden Schweißspalt.
T T-STA	Das Temperatur (T) Signal und dessen Standardabweichung liegen auf hohem bis mittlerem Niveau. Bei größerem Spalt und damit besserer Prozessruhe, intensiverer Durchschweißung wird die Schmelzbadlänge geringer und damit das T-Signal kleiner. Die Prozessunruhe bzw. -ruhe zeigt sich in der Standardabweichung.
P P-STA	Das Plasma (P) Signal und dessen Standardabweichungen hat ähnliches Verhalten wie die T-Signale. Bedingt durch die ungestörte Zinkentgasung; die deutlichere Durchschweißung; den geringeren absorbierten Energieanteil; die Verteilung des Metaldampfes durch die Kapillare nach unten, oben und in den Spalt, fällt die Signaltendenz mit steigendem Spaltmaß.

7.4 Nahtmerkmal „Geringer Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“

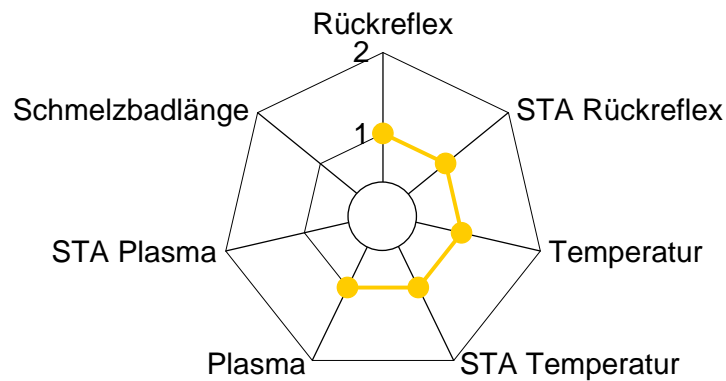


Abbildung 7-6 Nahtmerkmal „Geringer Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“ - Zuordnung der Inprozessgrößen

Abbildung 7-6 und Abbildung 7-7 demonstrieren diesen Prozesszustand. Die Zinkentgasung, die Laserenergieabsorption, Transmission und Reflexion und die Schmelzenströmungen sind besonders ungestört und gleichförmig. Es ist der stabilste Prozesszustand bei dem die optisch besten Schweißnähte mit besonders glatten Oberflächen entstehen. Die Dampfkapillare ist durch den noch vorhandenen Spalt geteilt; die Zinkgasabströmung ist ungestört; die Einzelschmelzen umströmen die obere und untere Kapillare und vereinigen sich erst in der Gegend der Kapillarrückwand. Die vereinigte Schmelze füllt den Schweißspalt und bedingt durch das dabei erforderliche Volumen den Nahteinfall oben bzw. Wurzelrückfall unten. Bei dieser Spaltgröße ist es noch gewährleistet, dass sich die Einzelschmelzen kurz nach dem Einstich finden und vereinigen.

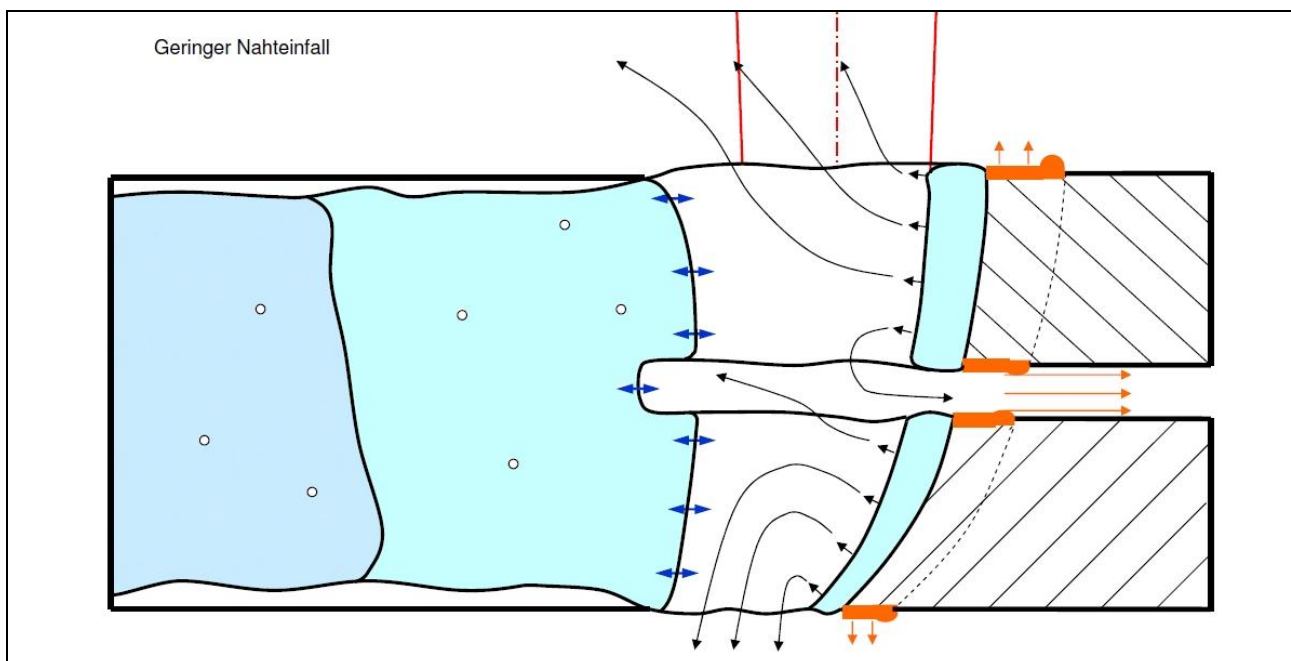


Abbildung 7-7 „Geringer Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“

SBL	Die Länge des Schmelzbades steigt in diesem Prozessfenster, beginnend vom Minimalwert mit steigendem Schweißspalt wiederum an. Ursachen sind geänderte Wärmeleitungs- und Schmelzenflussbedingungen. Die Kohäsionskräfte der vereinigten flüssigen Schmelze ziehen diese in die Tiefe der Fügeebene. Mehr und mehr wird auch die rückseitige Kapillarwand nach hinten gezogen. Auf Grund des großen Wertebereiches (Bereich 1 und 2) der Schmelzbadlänge bei diesem Nahtmerkmal in diesem konkreten Beispiel, wird der Parameter für die Zuordnung nicht verwendet.
R	Das (R) Signal liegt auf geringem Niveau. Bedingt durch die verminderten Störungen der Kapillar- und Schmelzenflussausprägung bewirkt die deutlichere Durchschweißung die reduzierte Reflexion der Laserstrahlung.
R-STA	Der ruhige ungestörte Prozess zeigt sich deutlich in diesem Signal.
T	Das T-Signal liegt auf niedrigem, relativ konstantem Millimeter-Mittelwert-Niveau. Die Konstanz ist scheinbar im Widerspruch zur anwachsenden Schmelzbadlänge. Das Signal hängt vom Energiegehalt und der Größe der abstrahlenden Oberfläche ab, die sich trotz des wachsenden Abstandes von der Kapillarfront bis zum hinteren Schmelzenerstarrungszipfel nur wenig verändert.
T-STA	Die Schwankungen des T-Signals liegen auf mittlerem bis niedrigem Niveau mit fallender Tendenz bei steigendem Spalt und widerspiegeln den ungestörten Prozess mit fast zeitlich stationären Schmelzenflüssen.
P	Das durchschnittliche Plasmasignal – abhängig von der Menge und der Energieanstrahlung des Metaldampfes über und in der Kapillare – ist minimal. Die Aufteilung der Gesammetaldampfmenge in drei Ströme (oben, unten, Spalt) ist dafür die Ursache.
P-STA	Die Schwankungen des P-Signals liegen auf mittlerem Niveau mit fallender Tendenz bei steigendem Spalt. Bei der gewählten 2-Bereichsteilung können die Werte in beiden Bereichen liegen und werden deshalb bei der Merkmalszuordnung nicht benutzt.

7.5 Nahtmerkmal „Starker Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“

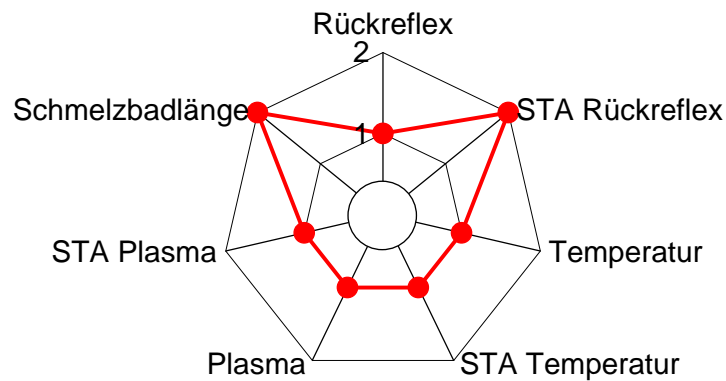


Abbildung 7-8 Nahtmerkmal „Starker Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“ - Zuordnung der Inprozessgrößen

Der Prozesszustand „Starker Naht- bzw. Wurzelrückfall“ tritt hauptsächlich auf, wenn vorher bei geringerem Spalt die Einzelschmelzen bereits miteinander verbunden waren. Andernfalls kommt es bei gleichem Spalt nur unregelmäßig zur Vereinigung der Schmelzen und somit zu einer Schweißnaht (siehe Abschnitt 7.7).

Das Auftreten von Nahteinfall oder Wurzelrückfall ist nicht abschließend geklärt. Meist tritt Nahteinfall an der Strahleintrittsseite auf. Beim konkreten Beispiel wurde in Wannenlage mit dem Laserstrahl von oben geschweißt – die Schmelze floss demzufolge entgegen der Schwerkraft. Maßgeblich könnten die Gradienten der Schmelzenviskosität über der Gesamtschweißdicke sein. Letztendlich haben die Energieverteilungen und die Schmelzenströme selbst auf das Ergebnis Einflüsse.

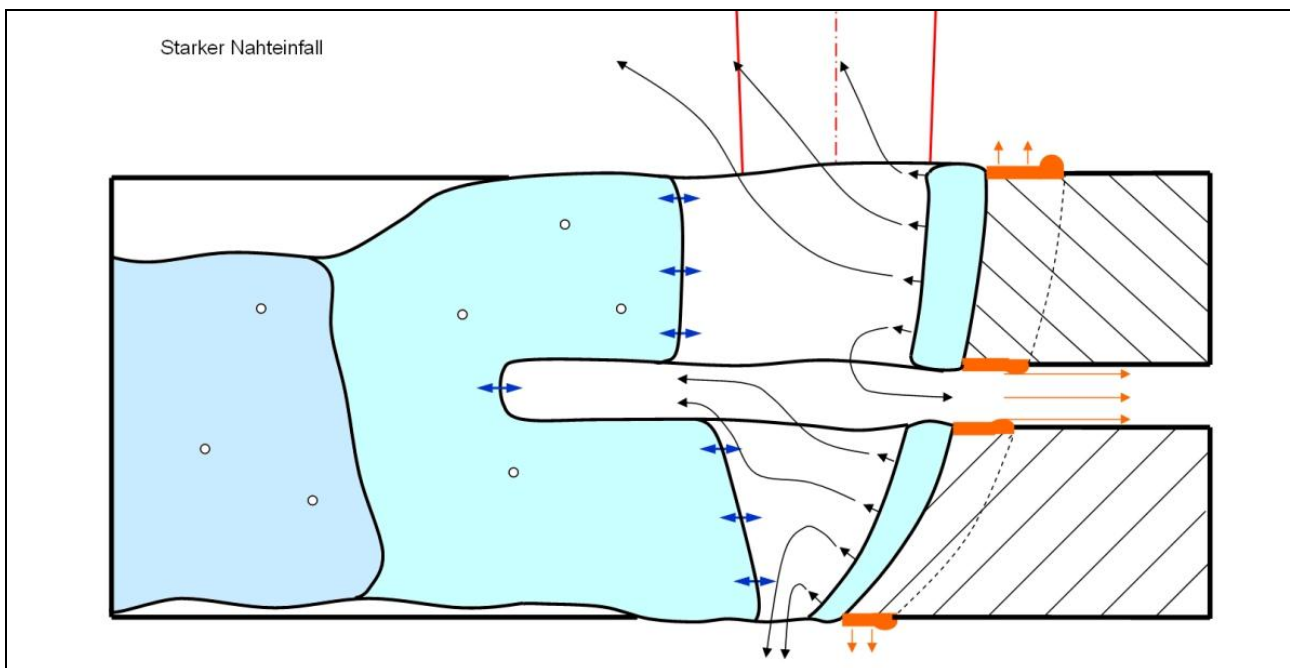


Abbildung 7-9 „Starker Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“

SBL	<p>Auf Grund des hohen Materialbedarfes zur Füllung des Spaltes und der wirkenden Kohäsionskräfte und Oberflächenspannungen der Schmelze wird das Schmelzbad in die Länge gezogen. Der Schmelzenvereinigungspunkt entfernt sich weiter von der Dampfkapillare. Der durch die geänderten geometrischen Verhältnisse geänderte Wärmestau und Wärmefluss unterstützt diese Erscheinung. Die Schmelzbadlänge erreicht Maximalwerte der betrachteten Schweißkonstellation.</p> <p>Im Übergangsbereich zum Merkmal Oben „geschnitten“ (7.6) kommt es zu kürzeren SBL wobei gleichzeitig deren Schwankungen größer werden. Hier ist die zusätzliche Auswertung eines Parameters SBL-STA sinnvoll.</p>
R	Für die beispielhaft angewandten Auswertungsgrenzen ist die Signalthöhe im Bereich 1, dort jedoch auf mittleren bis oberen Niveau. Die Durchschweißung fällt geringer aus und verursacht die vergrößerte Rückreflexion gegenüber dem Merkmal des geringen Nahteinfalls.
R-STA	Die Tendenz zur geringeren Durchschweißung bzw. der Grenzbereich zwischen Einschweißung und knapper Durchschweißung bewirken die höhere Instabilität dieses Signals. Mit steigendem Spalt wird die Neigung zum Kollaps der unteren Kapillare größer, durch das dann zur Spaltfüllung fehlende Material deutet sich der Übergang zum nächsten Nahtmerkmal „Oben geschnitten“ (7.6) an.
T P	Beide Signale verhalten sich nahezu gleich, liegen im festgelegten niederen Bereich 1 jedoch leicht höher als beim „falschen Freund“ oder dem geringeren Nahteinfall. Die verminderte Durchschweißung und damit Leistungstransmission erhöht neben der größeren Reflexion auch die Energieabsorption und somit die Temperatur und Metaldampfmenge bzw. deren Strahlungsmengen.
T-STA P-STA	Trotz der im R-STA ersichtlichen Durchschweißungsschwankungen prägen sich die Schmelzenabflüsse zur Spaltschließung sehr stabil und ruhig aus. Die in die Länge gedehnten und für unten und oben getrennten Dampfkapillaren werden kaum noch durch Zinkdampfströmungen gestört. Die Schwankungen der Pegel sind dem entsprechend gering.

7.6 Nahtmerkmal „Oben geschnitten“

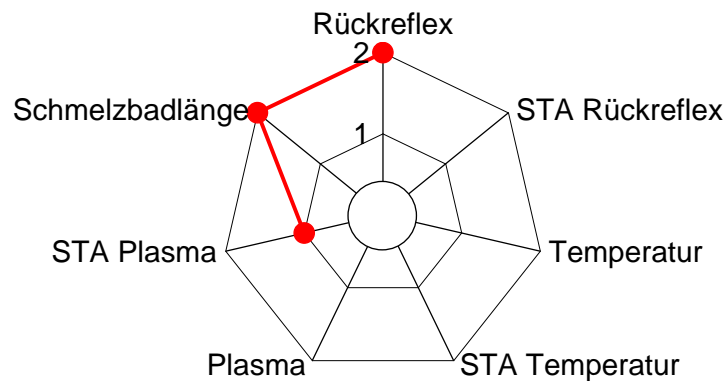


Abbildung 7-10 Nahtmerkmal „Oben geschnitten“ - Zuordnung der Inprozessgrößen

Dieses Laserschweißnahtmerkmal wird auch als Bindefehler bezeichnet und in der Praxis, bei kürzeren Längen als Löcher bewertet. Die zwei Schmelzenströme links und rechts der Dampfkapillare des oberen Bleches verbinden sich hinter dieser nicht wieder miteinander. Stattdessen fließen die beiden Schmelzen in die Tiefe in den Spalt und vereinigen sich mit der Schmelze des unteren Bleches. Nicht ungewöhnlich ist das Auftreten von Verbindungsstegen nur einseitig der ursprünglichen Schweißbahn. Vermehrt aus dem Oberblech verdampfendes Material transportiert Energieanteile aus der Wechselwirkungszone. Die durchgängige Dampfkapillare wird gestört oder bildet sich nicht aus. Der transmissive Leistungsverlust entfällt fast oder vollständig.

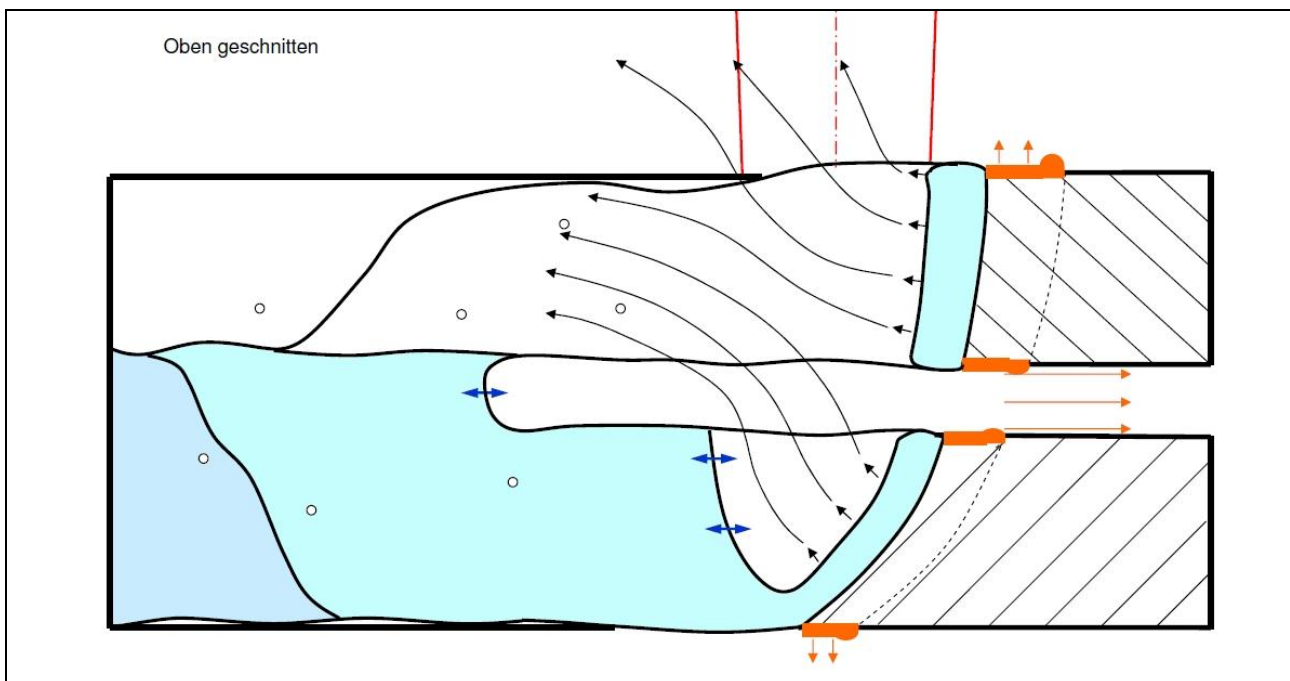


Abbildung 7-11 „Oben geschnitten“

SBL	Das oberflächliche Schmelzenbild wandelt sich von der Tropfenform hin zu einer langen kanalartig vertieften Ausprägung. Im Videobild sind die geraden seitlichen Flanken des oberen Bleches auffällig und könnten durch einen spezifischen Bildverarbeitungs-Algorithmus die Bewertungssicherheit erhöhen. Die Schmelze bleibt in der Tiefe lange flüssig und erstarrt ein- oder beidseitig der Fügelinie zwischen den Blechen.
R	Die verminderte Durchschweißung des unteren Bleches und die nur unvollständig ausgeprägte Dampfkapillare führen zum typischen sprunghaften Anstieg der Rückreflexion.
R-STA	Der Wert liegt auf mittlerem bis hohem Niveau und ist ein Indikator für die Stärke der Form- und Größenänderungen der Dampfkapillare. Beeinflussungen durch Zinkgasströme sind weitestgehend auszuschließen. Obwohl der Wert bei diesem Nahtmerkmal gewöhnlich im Bereich 2 liegt, ist seine Verwendung nicht zwingend notwendig.
T P	Beide Signale erreichen Höchstwerte (Bereich 2) die mit der hohen Verdampfungsrate aus dem Oberblech und der langen Schmelzbadlänge korrelieren. Die Verwendung beider Signale zur Nahtmerkmalsextraktion wäre möglich, ist jedoch nicht notwendig. (Da weitestgehend redundant mit R-Maximum.)
T-STA P-STA	Gegenüber den angrenzenden Nahtmerkmalen (Starker Nahteinfall und Falscher Freund) sind die Signalpegelschwankungen höher, insgesamt jedoch nur auf unterem bis mittlerem Niveau da die Schmelzenströmungen nicht oder nur wenig durch Zinkdampf gestört werden. Im Auswertebeispiel wird P-STA zur Merkmalsextraktion heran gezogen. Die Nutzung des T-STA-Signals ist alternativ, ggf. anwendungsspezifisch ebenfalls denkbar.

7.7 Nahtmerkmal „Falscher Freund“ (nicht verschweißt)

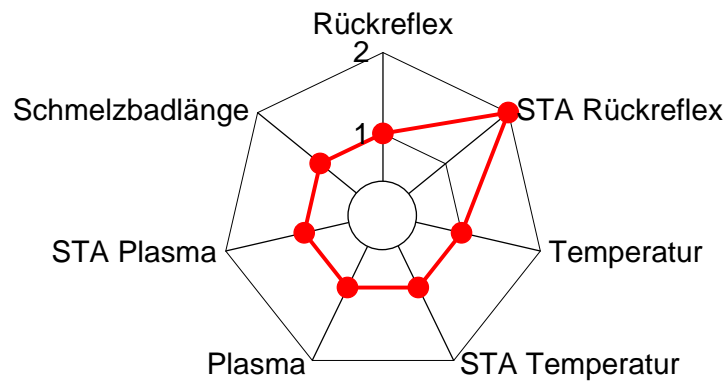


Abbildung 7-12 Nahtmerkmal „Falscher Freund“ - Zuordnung der Inprozessgrößen

Der „Falsche Freund“ ist das schlechteste Schweißergebnis mit dem besten Prozesszustand. Da die Bauteile nicht verbunden werden, kann nicht vom Schweißen im eigentlichen Sinn gesprochen werden. Mit einem Laserstrahl werden zwei unabhängige Blindnähte erzeugt. Der große Abstand zwischen den Blechen sorgt für störungsarme Schmelzenflüsse, schnelle Abkühlung, freie Zinkverdampfung und somit für einen weitestgehend stabilen und ruhigen Prozess. Die Flussbewegungen jeder der beiden Einzelschmelzen wird weder durch Zinkverdampfungen, noch durch die Schmelzenvereinigung gestört. Die Einzelschmelzen umströmen jeweils separat voneinander die Kapillaren im unteren und oberen Blech. Es kommt nicht zur Vereinigung der Schmelzen.

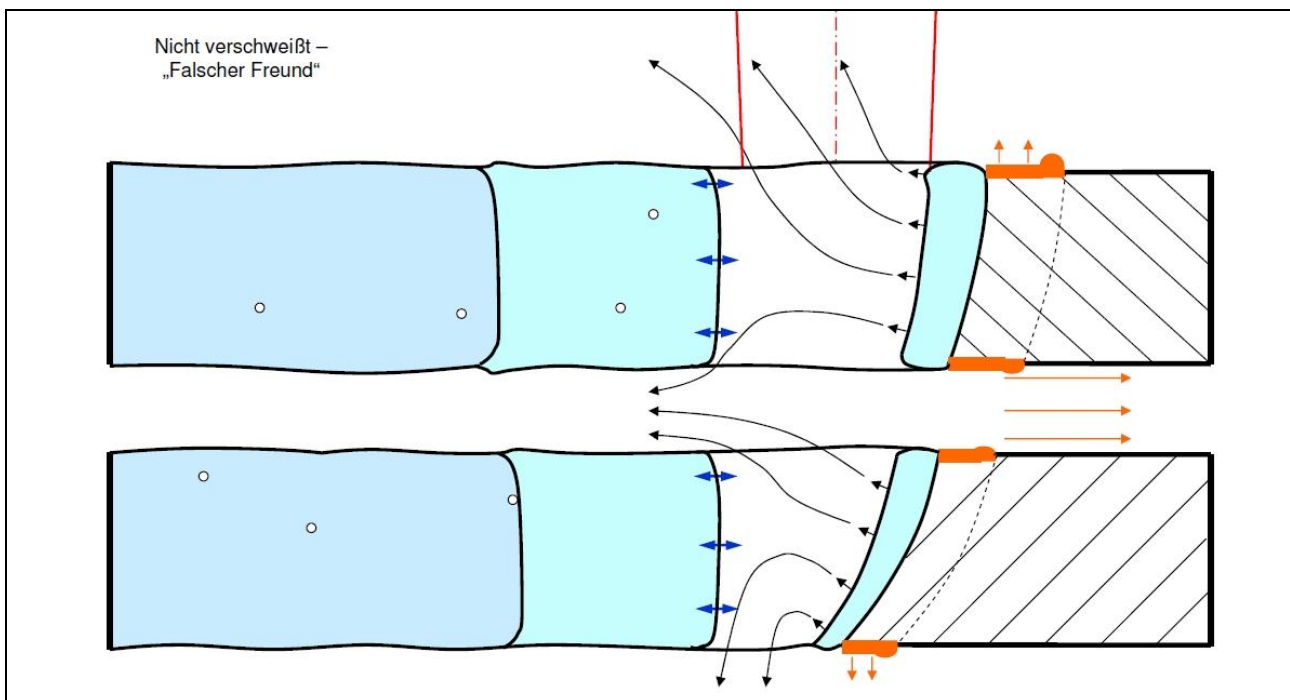


Abbildung 7-13 „Falscher Freund“

SBL	Die Schmelzbäder sind kurz, tropfenförmig und über die Nahtlängsmittenebene und die Blechmittenebene (jedes Bleches) annähernd symmetrisch. Die Erstarrung erfolgt ohne nennenswerten Nahteinfall.
R	Die Signalstärke liegt über iO und leichtem Nahteinfall, unter Spritzer, oben geschnitten und auf gleichem Niveau wie beim Merkmal „starker Nahteinfall“. Dies deutet auf ähnlichen Verhältnisse unmittelbar um die Kapillare bei beiden Merkmalsausprägungen hin.
R-STA	Der Hauptanteil der Rückreflexionen entsteht im Grund der Kapillare bzw. an deren Front in der Tiefe, im unteren Blech. Der Durchschweißprozess des oberen Bleches ist relativ gleichförmig. Dennoch ist der durch das obere Blech und den Spalt transmittierte Strahl beeinflusst und die untere Ein- oder Durchschweißung ist ungleichmäßiger als beim „geringen Nahteinfall“.
T	Das kurze, tropfenförmige Schmelzbad des oberen Bleches verursacht geringe T-Abstrahlungen, deren Pegelhöhen im Bereich 1 unterhalb des Schwellwertes sind.
P	Die Metaldampfmengen verteilen sich nach oben, in den großen Spalt und bei Durchschweißung nach unten durch die untere Kapillaröffnung. Dem entsprechend niedrig ist der Signalpegel.
T-STA P-STA	Im eingeschwungen Zustand sind die Schmelzen- und Metaldampfströmungen gleichmäßig, ungestört von der Schmelzenvereinigung und der voreilenden Zinkverdampfung. Beide Signalpegelschwankungen haben entsprechend niedrige Werte.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Laserstrahlschweißen im Karosseriebau ist zu einem konventionellen Fügeverfahren geworden. Dies gilt unabhängig von der Art der Strahlquelle, der Strahlführung und für die gesamte Sicherheits-, Steuerungs-, Automatisierungs- und Vorrichtungstechnik. Mehr und mehr Baugruppen sind speziell für die Laserverfahren konstruiert, nutzen deren spezifischen Eigenschaften gezielt aus und können nicht mehr mit anderen Fügeverfahren hergestellt werden.

Weiterentwicklungen in den Bauteilkonstruktionen und der Vorrichtungstechnik sind für den wachsenden Anteil höchstfester, insbesondere pressgehärteter Werkstoffe erforderlich. Gleichzeitig bedingt die Spaltproblematik beim Einsatz verzinkter Stahlblechsorten weiterhin höchste Beachtung. Umfangreiche Forschungsarbeiten in den vergangenen Jahren untersuchten verfahrensseitige Lösungsansätze, ergaben aber keine einzigartige Generallösung. Jedoch wurden verschiedene Methoden entwickelt, die je nach konkretem Anwendungsfall zur Lösung führen.

Fehlerursachen sind nicht mehr in der Lasertechnik zu finden, sondern zumeist in ungünstigen Spannbedingungen oder Bauteil-, Werkstoff- oder Beschichtungsabweichungen begründet. Trotz der hohen Präzision aller Fertigungskomponenten treten durch die Sensibilität des Fügeprozesses bedingte systematische und stochastische Nahtunregelmäßigkeiten auf. Systematisch erkennbare Ursachen sind die wenigen hundertstel bis zehntel Millimeter Bauteilgeometrie-, Positions- oder Beschichtungsabweichungen bzw. Toleranzen, deren umfassende Beherrschung noch aussteht. Unabhängig davon treten scheinbar zufällige Unregelmäßigkeiten trotz allseits optimaler Bedingungen auf.

Diese Tatsachen begründeten die vielfältigen Initiativen und Entwicklungen von Prozess- und automatisierten Inprozess-Qualitätsüberwachungssystemen. Zu deren Reihe auch das dieser Arbeit zugrundeliegende Projekt „Intelligentes Multisensorsystem“ gehörte. Trotzdem sind die Inprozess-Q-Systeme noch nicht so zur Selbstverständlichkeit geworden wie die Lasertechnik an sich im Karosseriebau. Hoher Anlernaufwand und Uneindeutigkeit der Aussagen sind nur einige der Gründe dafür.

Dennoch ist der Bedarf an automatisierter (d. h. Personal reduzierter), durchgehender Überwachung und Dokumentation der gefertigten Qualitätseigenschaften vorhanden. Den aktuellen Weg beschreiben die Anlagen zur Dach-Lötnahtprüfung (Abschnitt 2.2.2.2) und offline Thermografie (Abschnitt 2.2.1.5). Somit werden einerseits kundenrelevante optische Nahtoberflächeneigenschaften, andererseits festigkeitsbestimmende Eigenschaften der Schweißverbindung überprüft. Besonders von der Thermografie ist eine weitere Durchdringung der Prozessketten zu erwarten. Hier geht der Trend deutlich von der zyklischen Offline-Prüfung über die zyklischen Inline-Prüfung zur 100% Inline Prüfung hin. Eine notwendige Voraussetzung ist die stabile bildverarbeitende Auswertung der thermographischen Aufnahmen.

Nachteilig sind die erforderlichen zusätzlichen Prüfstationen in der Fertigungskette. Weiterhin können die Verfahren nur an gut zugänglichen Fügestellen der Baugruppen angewendet werden. Sichere Inprozess-Qualitätsbewertungsverfahren behalten somit ihre Bedeutung.

Mit den erfolgten Untersuchungen, den Tests verschiedener Werkstoffe, deren Kombinationen, den getesteten Sensoriken und Auswertemethoden wurden umfangreiche Erfahrungen gesammelt und dokumentiert. Der systematische Umfang, die feine Abstufung der Hauptstörgrößen bei den Testschweißungen, die realisierten Fehlerprovokationen und die Nähe zur industriellen Nutzung sind einzigartig. Daraufhin konnte die Reproduzierbarkeit von Laserschweißprozessemissionen und deren grundsätzliche Signalverläufe nachgewiesen werden.

Im Ergebnis wurde eine Methode entwickelt, um aus diesen Signalen mit einer erstaunlich einfachen Vorgehensweise entstandene Schweißnahtmerkmale zu prognostizieren. Die Merkmalseinteilung lehnt sich an der maßgeblichen Prüfvorschrift an und erreicht schon in dieser frühen Entwicklungsphase eine gute bis sehr gute Bewertungssicherheit.

Begründet und untermauert wird diese Methode mit der Erweiterung der bestehenden Modellvorstellung zur Laserstrahl-(Stahl)Werkstoff-Wechselwirkung vom Einschweißen zum Verschweißen der Nahtform I-Naht am 2-Blech Überlappstoß verzinkter Bleche. Die Vorgänge im Schweißprozess für jedes prognostizierbare Nahtmerkmal wurden skizziert, begründet und mit den Prozessemissionen in Zusammenhang gebracht. Notwendig wurde diese phänomenologisch erarbeitete Modellvorstellung auch dadurch, dass in zahlreichen Expertenbefragungen keine einheitliche konsistente Meinung über die Zusammenhänge zwischen Prozessemissionen und Nahtmerkmalen herausgearbeitet werden konnte.

Die erlangten Erkenntnisse werden der Verbesserung der Simulationsmodelle des Laserschweißprozesses zu gute kommen und die Entwicklungstendenzen entsprechender Systemanbieter beeinflussen. So wird die hardwareseitige Integration der Sensoren an weiteren Laserschweißwerkzeugen möglich sein. Die (Fremd-)Feldbeleuchtung des Schweißprozesses für die kamerabasierte Qualitätsüberwachung wird sich durchsetzen. An der Bildverarbeitungssoftware für die Extraktion der geforderten Größen aus den Bilddatenströmen wird gearbeitet. Die Programmier-, Einricht-, Bedien-, Auswerte- und Dokumentationssoftware wird entsprechende Auswertemethoden ermöglichen.

Ein mögliches Umsetzungsbeispiel für die Nahteigenschafts-Bewertungsmethode sind die Laserschweißnähte am Crashrohr der Golf 6 Zweitürer Türen (Abbildung 8-1, Abbildung 8-2, Abbildung 8-3)

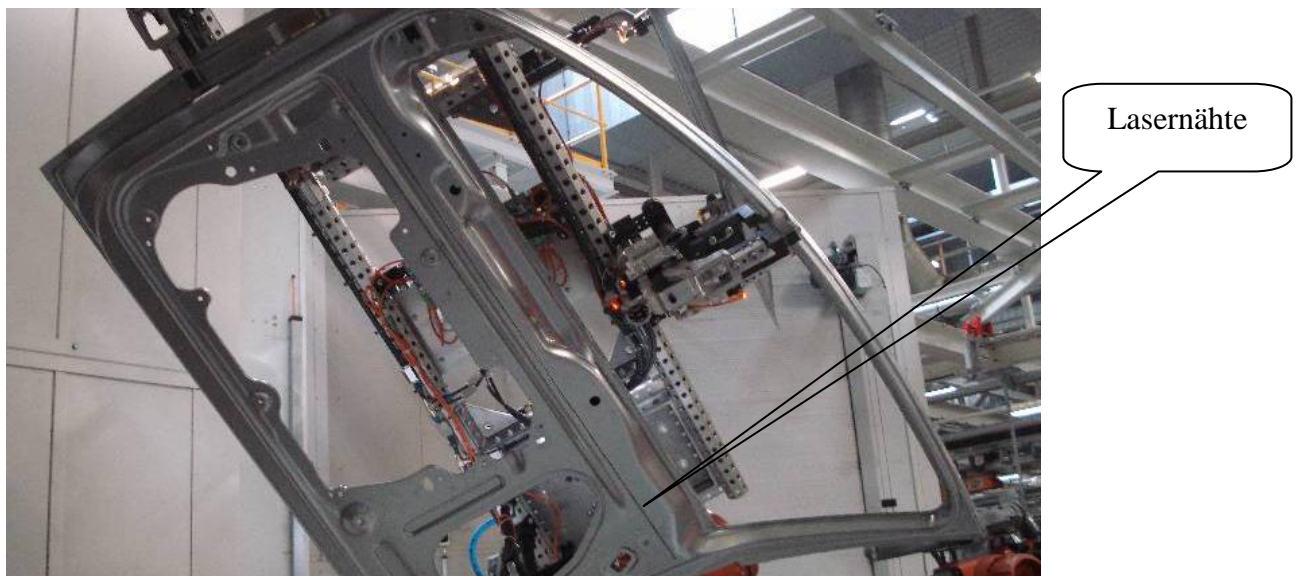


Abbildung 8-1 Golf 6, 2-Türer, Tür rechts

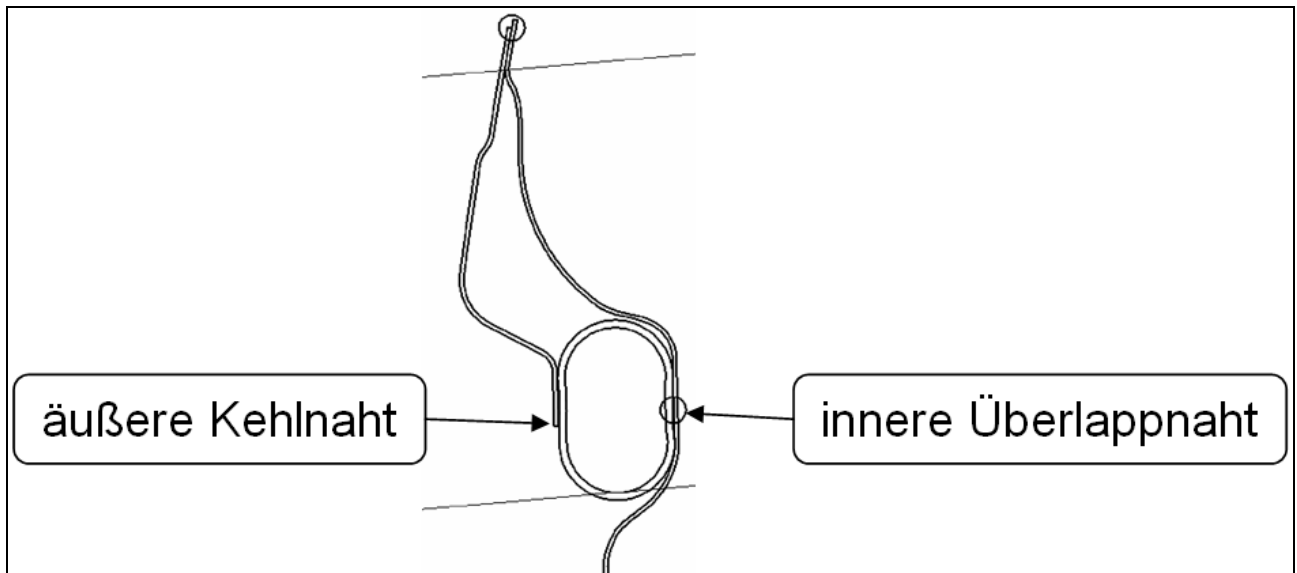


Abbildung 8-2 Zeichnungsschnittansicht Crashrohr mit Laserschweißnähten

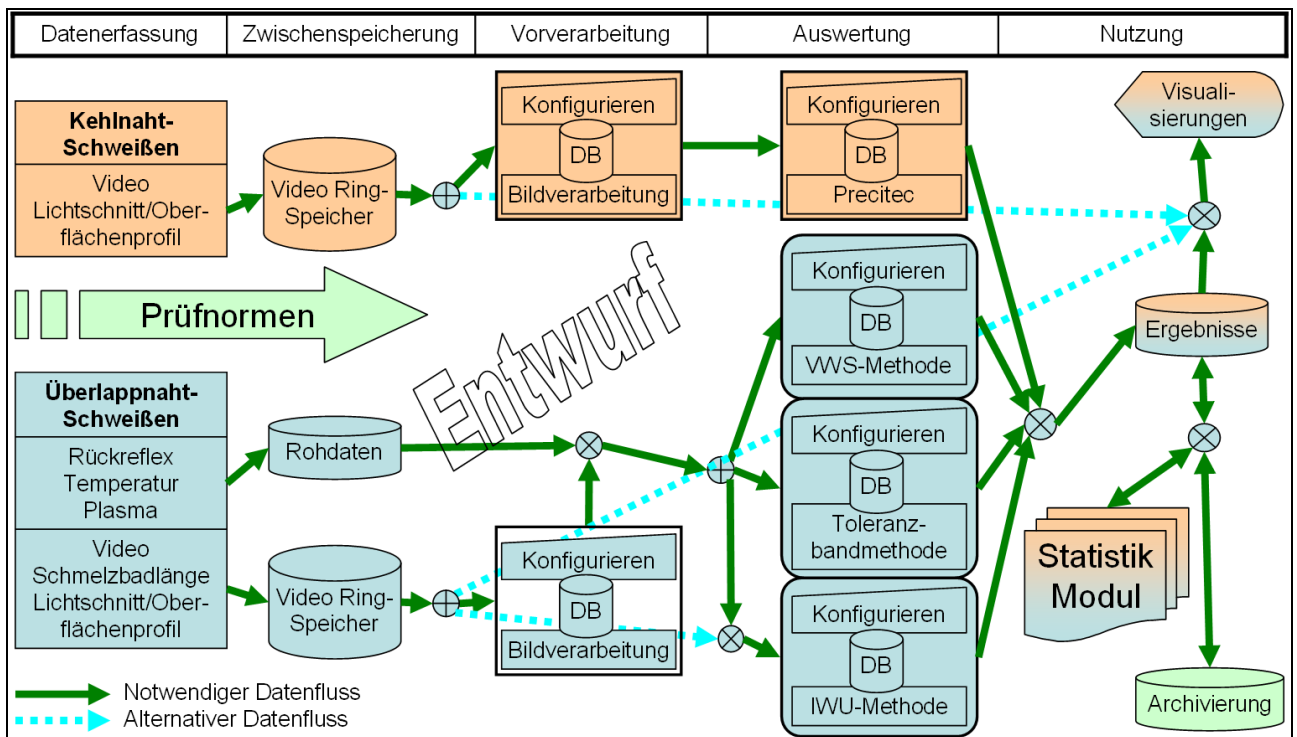


Abbildung 8-3 Daten- und Softwarestruktur der Umsetzungsanwendung

9 Verzeichnisse

9.1 Literatur

- [1] T. Tarui, K. Mori, S. Takemura, T. Hasegawa
Laser Welding Application of Nissan Car Bodies
NISSAN MOTOR Co., Ltd., Japan
Tagungsband EALA 2005
- [2] St. L. Ream
North American Automotive Laser Applications – Today and Tomorrow
Edison Welding Institute, USA
Tagungsband EALA 2005
- [3] D. van Nieuwerburgh, A. Smeyers, T. van der Veldt
Market introduction of Al tailor welded blank Technology
CORUS ALUMINIUM NV, B
Tagungsband EALA 2004
- [4] J. K. Larsson, N. Palmquist
Latest Laser Installation for the New Volvo S40 and V50
Volvo Car Corporation, S
Tagungsband EALA 2005
- [5] H. Hornig
Der Einsatz von Laserquellen im Automobilbau heute und morgen
BMW Group, D
Tagungsband EALA 2006
- [6] J. K. Larsson, N. Palmquist
Extensive Laser Welding Application on the New Volvo C70 Convertible
Volvo Car Corporation, S
Tagungsband EALA 2006
- [7] W. M. Zweers, N. Schlude
Current Laser Application in Convertible-Tops Production
Wilhelm Karmann GmbH, Osnabrück, Germany
Tagungsband EALA 2009
- [8] C. Ebert
Die lasergeschweißte Heckklappe des neuen Audi Q7
Audi AG, D
Tagungsband EALA 2006
- [9] A. Scherz
Lessons Learned beim Laserstrahlhartlöten des neuen 3er BMW
BMW Group, D
Tagungsband EALA 2006
- [10] J. Hover, G. Müller
The New Ford MONDEO „, featuring Ford’s first Laser-brazing Application
Ford Werke GmbH, DE
Tagungsband EALA 2008
- [11] Dr. I. S. Chang
Experiences with Fiberlaser Application for Roof Laser Welding
Hyundai Motor & Kia corp., KR
Tagungsband EALA 2008
- [12] F. Drexler
Latest Laser Joining Applications
Technocentre Renault SAS, FR
Tagungsband EALA 2008
- [13] A. Diguët
Latest laser application at RENAULT: flexible roof brazing station
Tagungsband EALA 2009

- [14] J. K. Larsson, N. Palmquist
The Volvo XC60 – a novel Model featuring new Laser Applications for increased Car Body Strength Properties and enhanced Quality
Volvo Car Corporation, S
Tagungsband EALA 2009
- [15] H. Hornig
Large-scale use of laser welding in the aluminium-based production at BMW
BMW Group, D
Tagungsband EALA 2009
- [16] R. Menin
The COMAU Standard 3D Remote Solution
COMAU S.p.A., I
Tagungsband EALA 2005
- [17] T. Tarui, T. Hasegawa, K. Mori
Latest laser Welding Applications for Nissan Body in White
NISSAN MOTOR Co., Ltd., JP
Tagungsband EALA 2007
- [18] T. Tarui, K. Mori, T. Hasegawa, T. Sakamoto
Remote Welding Application for Closure at NISSAN
NISSAN MOTOR Co., Ltd., JP
Tagungsband EALA 2008
- [19] I. S. Chang
Process with Hyundai Production technology Remote Welding Systems
Hyundai Motor & Kia corp., KR
Tagungsband EALA 2007
- [20] C. Bentini
Actual Remote Laser Application at FIAT Group
Centro Ricerche Fiat, IT
Tagungsband EALA 2008
- [21] M. Kielwasser
Current laser welding application project
The example Peugeot 3008-5008
PSA PEUGEOT CITROËN
Tagungsband EALA 2009
- [22] B. Lindgren
Radiator Support Structure
Van-Rob, Canada
Tagungsband EALA 2009
- [23] M. Niemeyer
Der YAG-Laserscanner im Einsatz für die Stahltüren des neuen Audi A4
Tagungsband EALA 2008, Audi AG, I/PG-621
- [24] R. Wouters
Heißer Tipp für weniger Schrott
Produktion, Problem und Lösung, 16/2007
- [25] A. Kropf
Application of thermography for inspection of laser welds as employed in Touran production at Auto 5000 GmbH
VW AUTO 5000 GmbH
Tagungsband EALA 2007
- [26] P.-M. Mickel, M. Kuhl
Möglichkeiten und Grenzen der Detektion von Bindefehlern durch Inprozess-Überwachung beim Laser-Schweißen
20. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida IWKM, 28.-29. Oktober 2009 Mittweida, Deutschland
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida, Lasertechnik Nr. 4, 2009, ISSN 1437-7624

- [27] R. Cordes, M. Norden
Die Karosseriestruktur des neuen Passat
Volkswagen AG, Arcelor Auto Symposium – Cannes, 16.-17. Juni 2005
- [28] S. Mengele
The Innovation in Remote-Laser-Welding
Tagungsband EALA 2008, KUKA Systems GmbH
- [29] Qualitätsmanagement-Handbuch
Volkswagen Sachsen GmbH Fahrzeugwerk Zwickau
- [30] R. Albrecht, J. Renner, S. Beier, A. Killig, M. Krebs, P.-M. Mickel
Zerstörungsfreie Prüfung von Laserschweißverbindungen mittels Thermografie
Body in White Symposium, 03.-04. November 2008 Dresden, Deutschland
- [31] M. Koch, St. Wischmann
Sensortechnology for Laserweldinglines applied at ThyssenKrupp Steel AG
ThyssenKrupp Steel AG
Tagungsband EALA 2007
- [32] H.-P. Vogt
Tailored Strips, ein neues Verfahren für den kostenoptimierten Leichtbau
ThyssenKrupp Tailored Blanks GmbH, DE
Tagungsband EALA 2008
- [33] D. Wildmann, M. Halschka, J. Schwarz, F. Wagner
New Concepts for Automated Quality Inspection of Laser Welds in Automotive Application
Soudronic AG, D
Tagungsband EALA 2004
- [34] H. Weber
Profilherstellung: Neue Möglichkeiten mit Hilfe der Lasertechnik
Dreistern GmbH + Co. KG
Lasertechnologie: Schlüssel zur wirtschaftlichen Fertigung im Zuliefererbereich
Kongress-Tagungsband 2006
- [35] M. Seidel, A. Zösch, R. Tunger, J. Pflügel
Aktuelle Erfahrungen beim Prüfen von Laserschweißnähten mit dem Wirbelstromverfahren
imq-Ingenieurbetrieb Crimmitschau, Volkswagen Sachsen GmbH
Tagungsband EALA 2007
- [36] Vorlesung Lasertechnik
Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Oberflächen- u. Fertigungstechnik,
Lehrstuhl für Laser- u. Oberflächentechnik 2009
- [37] G. Schulze
Die Metallurgie des Schweißens
4. Auflage
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [38] M. Staubach, R. Müller, S. Jüttner
Messung und Minimierung schweißtechnisch bedingter Verzüge an Profil-T-Stoßverbindungen
Schweißen und Schneiden 58 (2006) Heft 10
- [39] O. Hillers
Fehlerklassifizierende Prozesskontrolle mittels multivariater Statistik beim Laserstrahlschweißen
genehmigte Dissertation, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen Universität Hannover, 2003
- [40] S. Breitschwerdt
Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW
Herbert Utz Verlag Wissenschaft 2001, ISBN 3-8316-0032-5
- [41] W. Specker
Prozessüberwachung beim Schweißen mit Nd:YAG-Lasern
genehmigte Dissertation, Universität Hannover, Fachbereich Maschinenbau
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 614 2002, ISBN 3-18-361402-2
- [42] P. Sovetchenko
Herstellung beschichteter Mehrblechverbindungen im Karosseriebau mit Hilfe der Hochleistungslasertechnik

- genehmigte Dissertation, Universität Magdeburg, Fakultät Maschinenbau
Shaker-Verlag Aachen 2007, ISBN 3-8322-6106-0
- [43] Laser Welding Monitor WinLWM
Schweißprozess Online-Überwachung
Betriebsanleitung
Precitec KG 09/2004
 - [44] P. Gördes
Process Monitoring for Laser Welding Systems (Technische Firmenpräsentation)
Precitec KG 2008
 - [45] S. Kaierle
Process Monitoring and Control of Laser Beam Welding
Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Aachen, Germany
AKL 2008, Aachen,
 - [46] C. Gläser
Analyse und Erarbeitung von Optimierungspotentialen zur zerstörungsfreien Qualitätssicherung von Laserschweißverbindungen in der Karosseriefertigung
Diplomarbeit, Volkswagen Sachsen GmbH, Technische Universität Chemnitz, August 2007
 - [47] R. Schedewy
Machbarkeitsstudie zur Charakterisierung der Durchschweißung an Überlappschweißverbindungen, Parameterdokumentation
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Juli 2007
 - [48] R. Schedewy
Machbarkeitsstudie zur Charakterisierung der Durchschweißung an Überlappschweißverbindungen, Parameterdokumentation 2
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Juli 2007
 - [49] 1M28-SA Camer User's Manual
03-32-00525 rev 04
DALSA Printed 09/30/03 11:21 AM
 - [50] J. Bendl
Development and implementation of a new quality-assurance system for unattended online monitoring of laser processes
BMW Group
EALA 2010, Bad Nauheim,
 - [51] R. Porawe
Lasertechnik für die Fertigung
Springer Verlag Heidelberg 2005
 - [52] E. Beyer
Schweißen mit Laser, Grundlagen
Laser in Technik und Forschung
Springer Verlag 1995, ISBN 3-540-52674-9
 - [53] A. Blug, D. Carl, H. Höfler, Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg;
F. Abt, Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge FGSW, Stuttgart;
M. Geese, R. Tetzlaff, Institut für Angewandte Physik der Universität Frankfurt am Main
Pixelparallele Bildverarbeitung mit CNN zur Regelung von Laserschweißprozessen
Photonik 6/2008
 - [54] KATAYAMA Seiji*, WU Yushen** and MATSUNAWA Akira*
Laser Weldability of Zinc-Coated Steels
* Joining and Welding Research Institute, Osaka University
11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan
** Graduate Student of Osaka University (Presently, Kinki Sharyo Corp.)
ICALEO 2001
 - [55] M. Kogel-Hollacher
Sensorik und Datenauswertung zur industriellen Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen
Dissertation
Technische Universität Berlin 2008

- [56] QS-Verfahrensanweisung
1/3.4/005/24406
Ultraschallprüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen
Volkswagen Sachsen GmbH, 03.09.2007
- [57] QS-Arbeitsanweisung
1/3.4/0730/24404
Arbeitsablauf bei Sperrung von Material und Baugruppen im Produktionsbereich
Volkswagen Sachsen GmbH, 28.08.2007
- [58] C. Achmus
Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Verfahrensübersicht
Volkswagen AG, 16.02.2007
- [59] Betriebsanleitung Interner Sensor mit Ortsauflösung
BA SD LWM Dxl-Y100-D
Precitec KG 03.12.2001
- [60] Schlussbericht
MAINE X „Intelligentes Multisensorsystem zur inline-Komplexprüfung von Laserschweißnähten“
Verbundprojekt im Rahmen der Maschinenbauinitiative Next Economy
Volkswagen Sachsen GmbH, Januar 2008
- [61] 2. Zwischenbericht
MAINE X „Intelligentes Multisensorsystem zur inline-Komplexprüfung von Laserschweißnähten“
Verbundprojekt im Rahmen der Maschinenbauinitiative Next Economy
Volkswagen Sachsen GmbH, Mai 2007
- [62] 1. Zwischenbericht
MAINE X „Intelligentes Multisensorsystem zur inline-Komplexprüfung von Laserschweißnähten“
Verbundprojekt im Rahmen der Maschinenbauinitiative Next Economy
Volkswagen Sachsen GmbH, August 2006
- [63] Schlussbericht
MAINE IV „Laserprozess im Karosseriebau“
Verbundprojekt im Rahmen der Maschinenbauinitiative Next Economy
Volkswagen Sachsen GmbH, März 2006
- [64] R. Fischer
Messsystem zur Regelung von Laserschweißprozessen mit pixelparalleler Bildverarbeitung
Informationsdienst Wissenschaft, Pressemitteilung
Fraunhofer Vision, 09.03.2008
- [65] C. Kratzsch
Realisierung eines kamerabasierten Prozessüberwachungssystems am Beispiel des Laserstrahlschweißens
genehmigte Dissertation, Berichte aus der Lasertechnik, RWTH Aachen, Fakultät Maschinenbau
Shaker Verlag Aachen 2003, ISBN 3-8322-1637-5
- [66] A. Strauch
Effiziente Lösung des inversen Problems beim Laserstrahlschweißen durch Simulation und Experiment
Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW
Herbert Utz Verlag Wissenschaft 2004, ISBN 3-8316-0425-8
- [67] J. Huppertz
2-D CMOS Bildsensorik mit integrierter Signalverarbeitung
genehmigte Dissertation, Universität Duisburg, Fachbereich Elektrotechnik 2000
- [68] C. Reichert
Radioskopie an schmelzflüssigen Metallen zur Prozeßoptimierung
genehmigte Dissertation, Universität Hannover, Fachbereich Maschinenbau 2001
- [69] J. Skupin
Nichtlinear dynamisches Modell zum Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
genehmigte Dissertation, Universität Bremen, Fachbereich für Physik und Elektrotechnik
Shaker-Verlag Aachen 2004, ISBN 3-8322-2645-1
- [70] J. Müller-Borhanian, M. Halschka
Schweiß- und Löt­nähte automatisch überwacht
Laser Technik Journal 11/2008

- [71] R. Albrecht, J. Renner, S. Beier, A. Killig, M. Krebs, P.-M. Mickel
Zerstörungsfreie Prüfung von Laserschweißverbindungen mittels Thermografie
Body in White Symposium, Dresden 11/2008
- [72] H. Orlick
Laser- und Elektronenstrahl – Innovative Werkzeuge zur Materialbearbeitung für Industrie und Handwerk
Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle GmbH
3. Thementag Schweißen am 18. Mai 2006 in Wernigerode
- [73] M. M. S. Gualini
Laser Welding of Zinc Coated Steel Sheets. An Old Problem with a Possible Solution.
Pakistan Institute of Lasers and Optics, P.O. Box 1384, Islamabad, Pakistan
ICALEO 2001
- [74] M. Auger*, A. Ghasempoor**, P. Wild*
On-line Monitoring of CO₂ Laser Welding using Neural Networks
* Department of Mechanical Engineering, Queen's University Kingston, Ontario, Canada
** Department of Mechanical, Aerospace, and Industrial Engineering, Ryerson University Toronto, Ontario, Canada
ICALEO 2001
- [75] I. Miyamoto*, T. Inoue*, J. F. Tu**,
Kazuhiko Ono***, Kaoru Adachi*** and Kanji Katada***
Analysis of Keyhole Phenomenon Based on BGR Light Emission in 20kW-Class CO₂ Laser Welding
* Department of Manufacturing Science, Osaka University, Suita, Osaka, Japan
** School of Industrial Engineering, Purdue University West Lafayette, Indiana, USA
*** Manufacturing Engineering Development Center, Komatsu Ltd. Hirakata, Osaka, Japan
ICALEO 2001
- [76] J. Dowden
Driving Forces for Fluid Motion in the Weld Pool in Laser Keyhole Welding
Department of Mathematics, University of Essex, Colchester, Essex CO4 3SQ, UK.
ICALEO 2001
- [77] H. Ki, P. S. Mohanty* and J. Mazumder
Multiple Reflection and Its Influence on Keyhole Evolution
Center for Laser Aided Intelligent Manufacturing Department of Mechanical Engineering
The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125
* Department of Mechanical Engineering of Michigan, Dearborn, MI 48126-1409
ICALEO 2001
- [78] S. Rabier, M. Médale, and R. Fabbro*
3-D Numerical Modeling of Laser Welding
IUSTI CNRS UMR 6595
Technopole de Château Gombert, 5 rue Enrico Fermi 13453 Marseille Cedex 13
* CLFA 16 bis Av. Prieur de la Côte d'Or F-94114 ARCUEIL Cedex FRANCE
ICALEO 2001
- [79] R. Mueller
Chromatic Analysis of Optical Emissions from Laser Welding
Powerlasers Ltd., Advanced Technologies Centre Kitchener, Ontario, Canada
ICALEO 2001
- [80] M. M. S. Gualini
Optical fringes method to measure the keyhole geometry
Pakistan Institute of Lasers and Optics P.O. Box 1384, Islamabad, Pakistan
ICALEO 2001
- [81] KATAYAMA Seiji*, SETO Naoki**, MIZUTANI Masami* and MATSUNAWA Akira*
X-Ray Transmission In-Situ Observation of Keyhole during Laser Spot Welding and Pulse-Shaping for Prevention of Porosity
* Joining and Welding Research Institute, Osaka University 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan
** Graduate Student of Osaka University (Presently, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)
ICALEO 2001

- [82] S. Kaierle, P. Abels, G. Kapper, C. Kratzsch, J. Michel, W. Schulz, R. Poprawe
State of the Art and New Advances in Process Control for Laser Materials Processing
Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Steinbachstraße 15, D-52074 Aachen, Germany
ICALEO 2001
- [83] H. K. Tönshoff, A. Ostendorf, K. Körber, O. Hillers
Principles of Reference-Free Process Monitoring for Laser Material Processing Based on a Multiple Sensor System
Laser Zentrum Hannover e.V., Germany
ICALEO 2001
- [84] J. Greses*, **, P.A. Hilton**, C.Y. Barlow¹, W.M. Steen***
Spectroscopic Studies of Plume/Plasma in Different Gas Environments
* Engineering Department, University of Cambridge, Cambridge, CB2 1RX, UK
** TWI, Granta Park, Abington, Cambridge, CB1 6AL, UK
*** Material Science Department, University of Cambridge, Cambridge, CB2 3QZ, UK and Laser Group, University of Liverpool, Liverpool, L69 3GH, UK
ICALEO 2001
- [85] S. Postma*, R. G.K.M. Aarts**, J. Meijer**, B. Jonker** and W. M. Zweers**
Penetration Control in Laser Welding of Sheet Metal using Optical Sensors
* Netherlands Institute for Metals Research (NIMR) P.O. Box 5008, 2600 GA, Delft, the Netherlands
** University of Twente, Faculty of Engineering P.O. Box 217, 7500 AE, Enschede, the Netherlands
ICALEO 2001
- [86] M.Y. Lee RIST Pohang, Korea
J.W. Kim Yeungnam Univ. Kyongsan City, Korea
Estimation of the Penetration Depth using Surface Temperature Sensing in Laser Welding
ICALEO 2001
- [87] M. B. Klein, B. Pouet Lasson Technologies, Inc. Culver City, California, USA
S. Kerckel, R. Kisner Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge, Tennessee, USA
In-Process Detection of Weld Defects Using Laser Ultrasonics
ICALEO 2001
- [88] R. Fabbro
Basic Processes in Deep Penetration Laser Welding
CLFA (Coopération Laser Franco-Allemande)
16 bis Avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 ARCUEIL Cedex France
ICALEO 2002
- [89] J. Petereit**, P. Abels*, S. Kaierle*, C. Kratzsch**, E.W. Kreutz**
Failure recognition and online process control in laser beam welding
* Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Steinbachstraße 15, D-52074 Aachen, Germany
++ Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen, Steinbachstraße 15, D-52074 Aachen, Germany
ICALEO 2002
- [90] H. Haferkamp*, A. Ostendorf*, J. Bunte*, J. Szinyur**, M. Höfemann***, P. Cordini*
Increased Seam Quality for Laser-GMA Hybrid Welding of Zinc-Coated Steel
* Laser Zentrum Hannover e.V. – Hannover, Germany
** Voest Alpine Division Motion – Linz, Austria
*** Salzgitter Flachstahl GmbH – Salzgitter, Germany
ICALEO 2002
- [91] M. Reeves, M. D. Stoikou, A. J. Moore, D. P. Hand,
J. R. Cho*, S. P. Edwardson**, K. G. Watkins**, G. Dearden**, P. French**, J. D. C. Jones
A System for Dynamic Shape Measurements During Laser Processing
School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh EH14 4AS, UK
* Rolls-Royce Ni-base UTC, University of Cambridge, Pembroke Street, Cambridge, CB2 3QZ, UK
** Laser Group, Department of Engineering, The University of Liverpool, L69 3GH, UK
ICALEO 2002
- [92] G. Bates and G. Kelkar
Determination of weld quality in pulsed Nd:YAG laser welds using IR and acoustic sensors
Unitek Miyachi International Monrovia, California, United States
ICALEO 2002

- [93] J. F. Tu*, T. Inoue**, I. Miyamoto**
Quantitative Characterization of Keyhole Absorption Mechanisms in 20 kW-Class CO₂ Laser Welding Processes
* School of Industrial Engineering, Purdue University, Indiana, USA
** Department of Manufacturing Science, Osaka University, Osaka, Japan
ICALEO 2002
- [94] F. Bardin, P. Aubry*, W. Knapp*, O. Collin**, W. S. O. Rodden, A. Cobo***, J. M. Lopez-Higuera***, J. D. C. Jones, D. P. Hand
Evaluation of Coaxial Process Control Systems for Nd:YAG Laser Welding in Aeronautics Application
Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh EH14 4AS, UK
* CLFA, 16 bis avenue Prieur de la Côte d'Or, Arcueil 94114 Cedex, France
** Snecma, RN7, BP 81, Evry 91003 Cedex, France
*** Universidad Cantabria, Avd. de los Castros, s/n, E-39005 Santander, Spain
ICALEO 2002
- [95] J. Beersiek
New Aspects of Monitoring with a CMOS camera for Laser Materials Processing
Prometec GmbH Aachen, Germany
ICALEO 2002
- [96] J. Greses*, **, P. A. Hilton**, C. Y. Barlow*, W.M. Steen***
Plume Attenuation under High Power Nd:YAG Laser Welding
* Engineering Department, University of Cambridge, Cambridge, CB2 1RX, UK
** TWI, Granta Park, Abington, Cambridge, CB1 6AL, UK
*** Material Science Department, University of Cambridge, Cambridge, CB2 3QZ, UK and Laser Group, University of Liverpool, Liverpool, L69 3GH, UK
ICALEO 2002
- [97] H. K. Tönshoff, A. Ostendorf, O. Hillers
Real-Time Classification of Laser Welding Process Irregularities by Using Multivariate Statistics
Laser Zentrum Hannover e.V. Hanover, Germany
ICALEO 2002
- [98] D. Pfluger, D. Harris, J. C. Ion
The Application of Optical Signal Detection for Characterizing Transitions during Laser Beam Welding
CSIRO Manufacturing Science and Technology
32 Audley Street, Woodville North, SA 5012, Australia
ICALEO 2002
- [99] M. Mizutani, S. Katayama
Keyhole Behavior and Pressure Distribution during Laser Irradiation on Molten Metal (1004)
Joining and Welding Research Institute, Osaka Univ., Osaka, Japan
ICALEO 2003
- [100] I. Kawaguchi, S. Tsukamoto, H. Honda, G. Arakane
Power Modulation in Deep Penetration Laser Welding
Optimization of Frequency and Waveform to Prevent the Porosity
Welding Metallurgy Group, Steel Research Center, National Institute for Material Science, Ibaraki, Japan
ICALEO 2003
- [101] J. Hu, H. L. Tsai
Modeling of Weld Pool Dynamics during Dual-Beam Laser Welding Process
Department of Mechanical and Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, USA.
Y. K. Lee, Occupant Safety Systems, TRW Automotive, Washington, Michigan, USA.
ICALEO 2003
- [102] M. Y. Krasnoperov, R. R. G. M. Pieters
Solidification Features of the Thin Steel Sheets in Keyhole Welding
The Netherlands Institute for Metals Research; I.M. Richardson, Dept. of Material Science and Technology, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
ICALEO 2003
- [103] J. Ortmann, E.W. Kreutz, Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH Aachen, Germany
C. Maier, T. Wehner, Hydro Aluminium Deutschland GmbH, Bonn, Germany
M. Kogel-Hollacher, Jurca Optoelektronik GmbH & Co. KG, Rodgau, Germany

- S. Kaierle, R. Poprawe, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen, Germany
Online detection of defect classes for laser beam welding
ICALEO 2003
- [104] J. Greses, P. A. Hilton
Laser-Vapour Interaction in High-Power cw Nd:YAG Laser Welding
TWI, Granta Park, Great Abington, Cambridge, UK; C.Y. Barlow, Engineering Department, University of Cambridge, Cambridge, UK; W.M. Steen, Material Science Department, University of Cambridge, Cambridge, UK and Laser Group, University of Liverpool, Liverpool, L69 3GH, UK
ICALEO 2003
- [105] R. Fabbro*, F. Coste*, D. Goebels**, M. Kielwasser**
STUDY OF ND-YAG LASER WELDING OF ZN-COATED STEEL THIN SHEETS
* GIP GERAILP/LALP (CNRS) 16 bis, Av. Prieur de la Côte d'Or 94114 ARCUEIL Cedex
** PSA Peugeot Citroen /CTV, Route de Gisy 78943 Velizy Cedex
ICALEO 2004
- [106] M. G. Forrest* and F. Lu**
ADVANCED DUAL BEAM LASER WELDING OF ZINC-COATED STEEL SHEETS IN LAP JOINT CONFIGURATION WITH ZERO GAP AT THE INTERFACE
* DaimlerChrysler Corporation, 2730 Research Drive, Rochester Hills, MI. 48309
** Feng Lu Consulting, 1143 Crest View, Bloomfield Hills, MI. 48302
ICALEO 2004
- [107] El-H. Amara*, R. Fabbro**, L. Achab*, F. Hamadi*, N. Mebani*
MODELING OF FRICTIONS ON KEYHOLE WALLS DURING VAPOR FLOW IN LASER WELDING
* Centre de Développement des Technologies Avancées, Laser Material Processing Group, Po. Box 17, Baba Hassen, Algiers, 16303, Algeria
** Coopération Laser Franco-Allemande, Laboratoire d'Applications des Lasers de Puissance, 16 bis Av. Prieur de la Côte d'Or 94114 Arcueil, France
ICALEO 2004
- [108] R. Fabbro*, S. Slimani**, F. Coste*, F. Briand**
STUDY OF KEYHOLE BEHAVIOR FOR FULL PENETRATION ND-YAG CW LASER WELDING
* GIP/LALP (CNRS) 16 bis, Av. Prieur de la Côte d'Or 94114 ARCUEIL Cedex France
** AIR LIQUIDE - CTAS 13, Rue d'Epluches 95319 St OUEN L'AUMÔNE France
ICALEO 2004
- [109] J. Beersiek*, T. Devermann*, K. Behler**
PRACTICAL APPLICATIONS OF IN-PROCESS MONITORING FOR LASER PROCESSES - NOT ONLY FOR SINGLE WELDS AND COMMON MATERIALS
* PROMETEC GmbH, Jülicher Str. 338, 52070 Aachen, Germany
** University of Applied Sciences, Wiesenstr. 14, 35390 Gießen-Friedberg, Germany
ICALEO 2004
- [110] L. M. Wee, L. Li
APPLICATION OF CONTROL VOLUME METHOD TO MODELLING OF LASER CUTTING STRIATION FORMATIONS
Laser Processing Research Centre, Department of Mechanical, Aerospace and Manufacturing Engineering, University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), P.O. Box 88, Manchester M60 1QD, UK
ICALEO 2004
- [111] M. Kogel-Hollacher*, C. Dietz*, T. Nicolay*, A. Kattwinkel*, T. Herzinger**, B. Kessler***, B. Schürmann***, M. Schmidt***, J. Müller-Borhanian****
CAMERA BASED PROCESS MONITORING OF THE CO2 AND ND:YAG LASER WELDING PROCESS: EXPERIENCES FROM APPLICATIONS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY
* Precitec Optronik GmbH, Raiffeisenstr.5d, 63110 Rodgau, Germany,
** DaimlerChrysler AG, Research and Technology, Ulm
*** Precitec KG, Gaggenau
**** FGSW mbH, Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge, Stuttgart
ICALEO 2004
- [112] J. Müller-Borhanian*, C. Deininger*, F. H. Dausinger**, H. Hügel**
SPATIALLY RESOLVED ON-LINE MONITORING DURING LASER BEAM WELDING OF STEEL AND ALUMINUM
* Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge (FGSW), Nobelstr. 15 70569 Stuttgart, Germany

** Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 43 70569 Stuttgart, Germany
ICALEO 2004

- [113] F. Bardin*, R. McBride*, A. Moore*, S. Morgan**, S. Williams**, J. D. C. Jones*, D. P. Hand*
REAL-TIME TEMPERATURE MEASUREMENT FOR PROCESS MONITORING OF LASER CON-
DUCTION WELDING

* Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh EH14 4AS, UK

** BAE SYSTEMS Advanced Technology Centre, Bristol BS34 7QW, UK
ICALEO 2004

- [114] S. Kaierle
Patented sensor system simultaneously measures the weld beam position and speed of processing on work-
pieces
Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Aachen, Germany
EALA 2009 Bad Nauheim

- [115] S. Kaierle, M. Ungers, C. Franz, S. Mann, P. Abels
Understanding the Laser Process
New Approaches for Process Monitoring in Laser Materials Processing
Laser Technik Journal, April 2010

- [116] M. Baur
Remote Lasereinsatz bei der Türenfertigung des Audi A4/Q5
Audi AG
5. Internationaler Workshop Faserlaser 2009

9.2 Normen

- [117] PV 6719
Laserstrahlschweißen an Stählen, I-Naht am Überlappstoß; Mehrblechschweißen
Volkswagen AG, Mai 2008
- [118] VW 01141-1
Laserstrahlschweißen; Stahlblechverbindungen
Volkswagen AG, Februar 2005
- [119] DIN EN ISO 13919-1
Schweißen - Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unre-
gelmäßigkeiten - Teil 1: Stahl
Deutsche Norm, September 1996
- [120] DIN EN 970
Zerstörungsfreie Prüfung von Schmelzschweißnähten, Sichtprüfung
Deutsche Norm, März 1997
- [121] DIN EN 12062
Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen
Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe
Deutsche Norm, September 2002
- [122] DVS Merkblatt 3210
Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Elektronen- und Laserstrahlschweißnähten
DVS, Juli 2007
- [123] DIN 8528
Schweißbarkeit metallische Werkstoffe, Begriffe
Deutsche Norm, Juni 1973
- [124] DIN EN ISO 6947
Schweißnähte Arbeitspositionen
Deutsche Norm, Mai 1997

9.3 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
1M-28	Kameratyp
2T	2-Türer
3-D	3-dimensional
4T	4-Türer
A2	Fahrzeugbezeichnung
A4	Fahrzeugbezeichnung
AFO	Arbeitsfolge
AG	Aktiengesellschaft
ALO	adaptive Löt Optik (der Firma Scansonic GmbH)
biO	bedingt in Ordnung
BMW	Beirische Motoren Werke
BPO	Oberflächenprägungen von Stahlblechen
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer aided design
CCD	Charge Coupled Device Bildsensor
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
C-Mount	Objektivgewinde-Typ
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPC	Coaxial Process Control
cw	continuous wave
d. h.; D. h.	dass heisst
DB	Datenbank
DC	Stahlsortenkurzzeichen
DIN	Deutsche Industrie Norm
DIPoEk	Durchgangslöcher, Poren Endkrater
DN	Digital Number, digitale Zahl
DX	Stahlsortenkurzzeichen
EALA	European Automotive Laser Application
EN	Europäische Norm
Fe	Eisen
FFT	Fast Fourier Transformation
FGSW	Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH
FhG	Fraunhofer Gesellschaft
fps	Frames per second
ggf.	gegebenenfalls
HL 4006 D	Laser-Typ
I-	Bezeichnung einer Schweißnahtform
ibs	ibs automation GmbH
imq	Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik GmbH
In-	während (dem Prozess)
INESS	Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen
INPRO	Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH
iO	in Ordnung
IR	Infrarot
ISO	International Standard Organisation
IWS	Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik
IWU	Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
JA-	Lasernahtbenennung nach Zeichnung
L	Laser-(Leistungs-)Signal
L-F	Tiefpass gefiltertes Laser-Signal
LinLog	Linear-Logarithmisch
LL	Links-Lenker
L-MM; L-mm	Laser-Millimeterpegel

L-oF	Laser-Signal ohne Tiefpassfilter (Rohsignal)
LPF	Laser Pass Finder
L-STA	Laser-Millimeterpegel-Standardabweichung
LWL	Lichtwellenleiter
LWM	Laser Welding Monitor
LWM-C	Laser Welding Monitor mit Kamera-Bildverarbeitung
MAG	Metall-Aktivgas-Schweißen
MAINE	Maschinenbau Initiative Next Economy
MIG	Metall-Inertgas-Schweißen
MM	Millimeterpegel
NAR	Nordamerika-Ausführung
Nd:YAG	Neodym-Yttrium-Aluminium-Granat
niO	nicht in Ordnung
P	Plasmasignal
P1K/F	Abteilungskennzeichen der Volkswagen AG
P1K/F	Abteilungskurzzeichen
PA	Arbeitsposition nach DIN EN ISO 6947
PC	Personal Computer
PC	Arbeitsposition nach DIN EN ISO 6947
PD	Oberflächenprägungen von Stahlfeinblechen
PF	Arbeitsposition nach DIN EN ISO 6947
P-F	Tiefpass gefiltertes Plasma-Signal
PFO	programmierbare Fokussieroptik
PKW	Peronen Kraftwagen
P-MM; P-mm	Plasma-Millimeterpegel
P-oF	Plasma-Signal ohne Tiefpassfilter (Rohsignal)
Post	nach (dem Prozess)
Pre-	vor (dem Prozess)
P-STA	Plasma-Millimeterpegel-Standardabweichung
PV	Prüfvorschrift
QE	Quantum Efficiency
R	Laser-Rückreflex-Signal
RDW	Rest der Welt-Ausführung
R-F	Tiefpass gefiltertes Rückreflex-Signal
RL	Rechts-Lenker
R-MM; R-mm	Rückreflex-Millimeterpegel
R-oF	Rückreflex-Signal ohne Tiefpassfilter (Rohsignal)
ROI	Region of Interest
RSK	Rollenspannkopf
R-STA	Rückreflex-Millimeterpegel-Standardabweichung
RTP	Rückreflex-Temperatur-Plasma-Signale
RTPL	Rückreflex-Temperatur-Plasma-Laser-Signale
SAD	Stahl-Ausstelldach
SBL	Schmelzbadlänge
SN	kleinste gemeinsame Verbindungsbreite (Istwert der Nahtdicke) in mm
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STA	Standardabweichung
T	Temperatursignal
TCP	Tool Center Point
T-F	Tiefpass gefiltertes Temperatur-Signal
TKDN	ThyssenKruppDrauzNothelfer
T-MM; T-mm	Temperatur-Millimeterpegel
T-oF	Temperatur-Signal ohne Tiefpassfilter (Rohsignal)
TPS	Typenschild
T-STA	Temperatur-Millimeterpegel-Standardabweichung
TWB	Tailor Welded Blank

u. a.	unter anderem
u. ä.	und ähnliches
v. o. n. u.	von oben nach unten
vgl.	vergleiche
VIS	visible
VW	Volkswagen
WPS	Widerstandspunktschweißen
WT	Wavelet Transformation
X	Raumkoordinatenrichtung
Y	Raumkoordinatenrichtung
YW50	Laserschweißkopf-Typ
Z	Zink
Z	Raumkoordinatenrichtung
z. B.	zum Beispiel
Z100	100 g/m ² feuerverzinkte Zinkauflage
ZE	elektrolytische Verzinkung
ZStE	Stahlbezeichnung

9.4 Formelzeichen

Größe	Einheit	Bedeutung
E	nJ	Energie in Nanojoule
f	Hz	Frequenz in Herz
K	dB	Dynamikumfang in Dezibel
l	µm	Länge in Mikrometer
l	mm	Länge in Millimeter
P	kW	Leistung in Kilowatt
P	W	Leistung in Watt
T	K	Temperatur in Kelvin
t	µs	Zeit in Mikrosekunden
t	min; Min	Zeit in Minuten
t	ms	Zeit in Millisekunden
t	s	Zeit in Sekunden
U	V	elektische Spannung in Volt
U	µV	elektische Spannung in Mikrovolt
α	mrاد	Winkel in Millirad
λ	nm	Wellenlänge in Nanometer
Ω	sr	Raumwinkel in Steradian

9.5 Abbildungen

Abbildung 2-1 Geschichte der Laseranwendungen im Karosseriebau bei BMW [15].....	4
Abbildung 2-2 Geschichte der Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volkswagen [Volkswagen AG, P1K/F]	4
Abbildung 2-3 Geschichte der Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volvo [14].....	5
Abbildung 2-4 Prozentualer Lasereinsatz bei Volkswagen Fahrzeugen [25]	6
Abbildung 2-5 Fügetechnologien bei der Golf und Passat Karosseriefertigung [26]	7
Abbildung 2-6 Fügetechnik am Passat [27]	7
Abbildung 2-7 Ausführungsarten der Laserwerkzeuge	8
Abbildung 2-8 Zinkschichtdickendiagramm [MAINE III]	9
Abbildung 2-9 I-Naht am Überlappstoß an Karosseriebaugruppen (links: Prinzip 2-Blech, 3- Blech, 2-Blech-Flanschverbindung; rechts: 3-Blechflansch, Außen- und Innenansicht)	10

Abbildung 2-10 Makroschliffbilder von Laserschweißnähten 1: Loch oben durch Materialauswurf 2: iO-Naht 3: Nahteinfall und Wurzelrückfall 4: keine Verbindung.....	11
Abbildung 2-11 Scannerschweißen am Passat.....	12
Abbildung 2-12 Laserfügen - Prüfen und Überwachen [26]	14
Abbildung 2-13 Metallografisches Querschliffbild zur Beurteilung des inneren Befundes und der Anbindemaße (Bewertung nach [117] niO; Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall > 0,25 t) [imq GmbH Crimmitschau]	16
Abbildung 2-14 Thermografie - Aufbau und Wirkungsweise [30]	17
Abbildung 2-15 Thermografieanlage bei Volkswagen Sachsen.....	18
Abbildung 2-16 Naht JA3-3031 von innen.....	18
Abbildung 2-17 Naht JA3-3031 von außen	18
Abbildung 2-18 Hardware Dachlaserlötnahtprüfung.....	19
Abbildung 2-19 Software Dachlaserlötnahtprüfung [Krempien+Petersen Qualitäts-Kontrollsysteme GmbH]	20
Abbildung 2-20 Wirbelstromprüftest an Schwellernähten	22
Abbildung 2-21 Oberflächenscanner in Kombination mit der Wirbelstromsonde	22
Abbildung 2-22 Modelldarstellung des Tiefschweißprozeß nach [36] ergänzt um die gewöhnlich bei der Prozessüberwachung erfassten Emissionsarten; Laser-(R)-Rückreflex, Plasma-(P)-Strahlung, IR-(T)-Strahlung, Körperschall, Luftschall	23
Abbildung 2-23 Strahlungsintensität über der Wellenlänge des Laserschweißprozesses [FhG IWS, 2004]	24
Abbildung 2-24 Laserschweißprozessbeobachtung ohne Beleuchtung, ohne Beleuchtung in Falschfarben-Darstellung, mit Zusatzbeleuchtung	25
Abbildung 3-1 höchste Prozessanforderungen: Verschweißen von warmumgeformten bzw. pressgehärteten Karosserie-Strukturbauteile.....	30
Abbildung 3-2 Messung thermischer Verformungen – schematischer Versuchsaufbau	31
Abbildung 4-1 Precitec-LWM: "Signal-Charakteristik - Fehlerverarbeitung" [43]	32
Abbildung 5-1 verwendeter Bearbeitungskopf	35
Abbildung 5-2 Prinzipieller optischer Aufbau des verwendeten Bearbeitungskopfes	35
Abbildung 5-3 Kameraanschlussmodul mit Kamera	35
Abbildung 5-4 Lichtwege zu den Sensoren im YW50 [44].....	36
Abbildung 5-5 Spektrales Antwortverhalten des Kamerasensors [49]	37
Abbildung 5-6 Sichtbereiche der RTP-Photodetektoren	38
Abbildung 5-7 Spektrale Einordnung der YW50 Sensoren im doppelt logarithmisch aufgetragenen Planckschen Strahlungsspektrum.....	39
Abbildung 5-8 Laserzelle mit zwei Robotern und Linearachse.....	40
Abbildung 5-9 LWM	40
Abbildung 5-10 Signalpegel einer Referenzschweißung in Toleranzschläuchen v. o. n. u. Laser (L-F), Rückreflex (R-F), Temperatur (T-F), Plasma (P-F)	41
Abbildung 5-11 Qualitativer Vergleich der Signalpegelhöhen der Erst-Testschweißungen.....	42

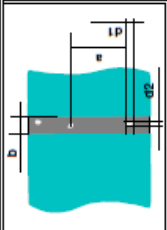
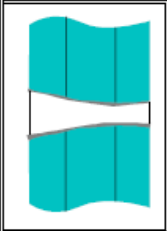
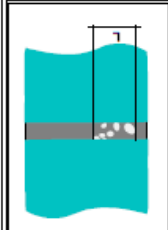
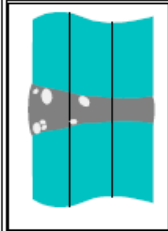
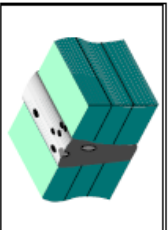
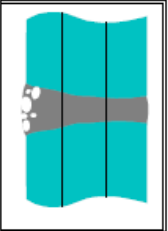
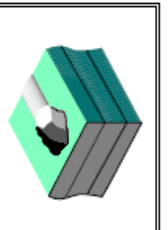
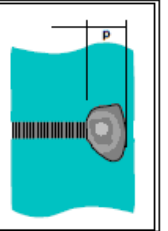
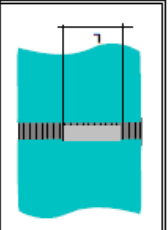
Abbildung 5-12 Konstantspalt	43
Abbildung 5-13 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom Spalt; Wannenlage, 3000 W, 60 mm/s	44
Abbildung 5-14 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom Spalt; vertikal steigend, 3000 W, 60 mm/s	44
Abbildung 5-15 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom Spalt; vertikal steigend, 3500 W, 60 mm/s	45
Abbildung 5-16 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit vom der Fokuslage; Wannenlage, 3000 W, 60 mm/s	46
Abbildung 5-17 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Fokuslage; vertikal steigend, 3000 W, 60 mm/s	46
Abbildung 5-18 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Fokuslage; horizontal- horizontal, 3500 W, 60 mm/s	47
Abbildung 5-19 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Laserleistung; Wannenlage	48
Abbildung 5-20 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit; Wannenlage	48
Abbildung 5-21 Mittelwerte der Signalpegel in Abhängigkeit von der seitlichen Winkelstellung; Wannenlage	49
Abbildung 5-22 iO-Naht Signalpegel - 0,2-Spalt	50
Abbildung 5-23 niO-Naht Signalpegel - 0-Spalt	51
Abbildung 5-24 Signalpegel - Keilspalt 0,1 bis 0,8 mm	51
Abbildung 5-25 Lasernähte im PKW-Heckbereich (mit Nacharbeitslösung für niO-Nähte)	52
Abbildung 5-26 Mittelwerte der Signalpegel über dem Spalt für 2 x H220 PD Z100 MB 0,7 mm	53
Abbildung 5-27 Bearbeitungsvarianten der Signalpegel	57
Abbildung 5-28 unbeleuchtete koaxiale Schweißprozessbilder	58
Abbildung 5-29 Thermografiebild von Testnähten [46]	60
Abbildung 5-30 Konstantspaltschweißung mit 0 mm	61
Abbildung 5-31 Konstantspaltschweißung 0,05 mm	62
Abbildung 5-32 Konstantspaltschweißung mit 0,2 mm	63
Abbildung 5-33 Konstantspaltschweißung mit 0,5 mm	64
Abbildung 5-34 RTPL-Signalpegel über dem Spalt	66
Abbildung 5-35 Intensität, Kantenqualität, Hinterkante über dem Spalt	66
Abbildung 5-36 ansteigender Keilspalt	67
Abbildung 5-37 Schweißen mit steigenden Keilspalt	68
Abbildung 5-38 Schweißen mit fallenden Keilspalt	69
Abbildung 5-39 Ermittlung der Dampfkapillarenlänge aus koaxialem Prozessvideo entlang der Nahtlänge bei steigendem Schweißspalt [FhG IWS]	70
Abbildung 5-40 Laboreinrichtung zur off-axis Beobachtung	71
Abbildung 5-41 Beginn einer Schweißung mit 0,2 mm Spalt	72

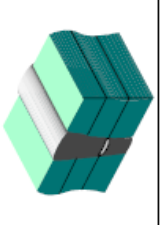
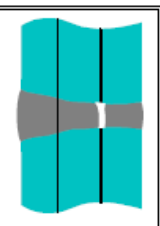
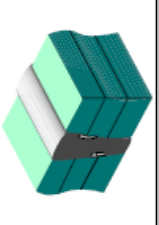
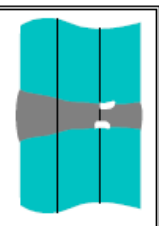
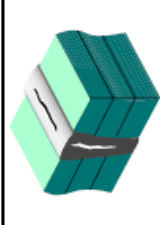
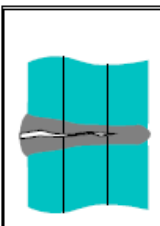
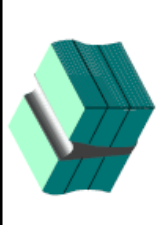
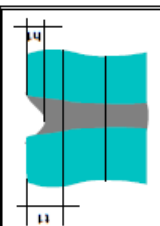
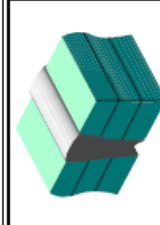
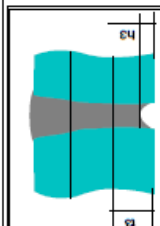
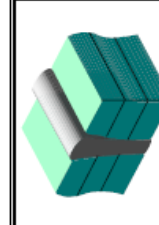
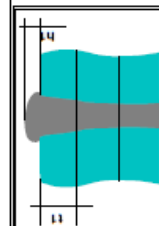
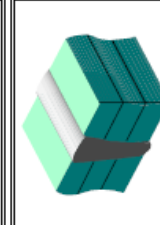
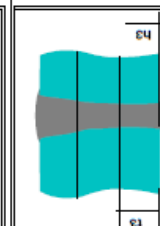
Abbildung 5-42 Versuchsaufbau in Zusammenarbeit mit IWS bei Volkswagen Sachsen.....	73
Abbildung 5-43 Standbild jeweils des Thermografie und der mittels Diodenlaser ($\lambda=940$ nm) beleuchteten Oberraupe und Nahtwurzel dreier Schweißnähte (DC06 ZE 50/50 BPO 0,75 mm auf ZStE 340 Z100 1,5 mm; PC Position, Laserleitung 3000 W, Schweißgeschwindigkeit 25 mm/s)	74
Abbildung 5-44 Spectral Responsivity [49].....	75
Abbildung 5-45 Quantum Efficiency as a Function of Wavelength [49]	75
Abbildung 5-46 RLDB808-4000-5, 808 nm, 4 W, 58 x 110 mm am YW50 angebracht.....	76
Abbildung 5-47 Prototyp Beleuchtungsmodul	76
Abbildung 5-48 Bilder einer Schweißnaht beleuchtet mit dem 4 W Diodenlasermodule RLDB808-4000; Nahtlänge 100 mm, Wannenlage, ZStE 340 Z100 1,5 mm auf DC 06 ZE 50/50 BPO 0,75 mm, $v = 50$ mm/s, $P = 3500$ W, ansteigender Keilspalt von $\sim 0,1$ bis $\sim 0,8$ mm, Kamera ROI 256×128 Pixel ² , 810,74 Bilder/s, Belichtungszeit je Bild 0,04 ms, optischer Bandpassfilter 800-40 nm	77
Abbildung 5-49 Versuchsaufbau	79
Abbildung 5-50 steigender Spalt 0 bis 1 mm, Millimeterpegel, Merkmale, Schliffe.....	81
Abbildung 5-51 steigender Spalt 0 bis 1 mm, Standardabw., Prozessvideobilder	82
Abbildung 5-52 fallender Spalt 1 bis 0 mm, Millimeterpegel, Merkmale.....	83
Abbildung 5-53 fallender Spalt 1 bis 0 mm, Standardabw., Prozessvideobilder.....	84
Abbildung 6-1 Beispiel für die Festlegung des Signalpegel-Schwellwertes im Plasma-Millimeterpegel (P-mm) in Abhängigkeit der vorhandenen Nahtmerkmale (Grenze zwischen iO-Bereich und geringem Nahteinfall).....	87
Abbildung 6-2 Aus den Inprozess Daten berechnete Nahteigenschaften	92
Abbildung 6-3 Aus den Inprozess Daten berechnete Nahteigenschaften	94
Abbildung 6-4 Merkmalsübergänge in Abhängigkeit von Spaltänderungen.....	96
Abbildung 7-1 Skizze der Laserstrahl - Blech - Spalt - Blech – Wechselwirkungszone bei Überlappschweißen.....	97
Abbildung 7-2 Nahtmerkmal „Spritzer“ - Zuordnung der Inprozessgrößen	99
Abbildung 7-3 „Spritzer“ (0-Spaltschweißen)	99
Abbildung 7-4 Nahtmerkmal „In Ordnung“ - Zuordnung der Inprozessgrößen	102
Abbildung 7-5 „iO-Bereich“	103
Abbildung 7-6 Nahtmerkmal „Geringer Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“ - Zuordnung der Inprozessgrößen	104
Abbildung 7-7 „Geringer Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“	104
Abbildung 7-8 Nahtmerkmal „Starker Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“ - Zuordnung der Inprozessgrößen	106
Abbildung 7-9 „Starker Nahtein- bzw. Wurzelrückfall“	106
Abbildung 7-10 Nahtmerkmal „Oben geschnitten“ - Zuordnung der Inprozessgrößen	108
Abbildung 7-11 „Oben geschnitten“	108
Abbildung 7-12 Nahtmerkmal „Falscher Freund“ - Zuordnung der Inprozessgrößen	110


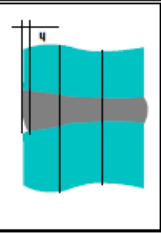
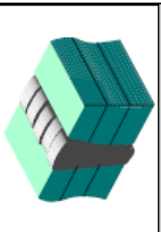
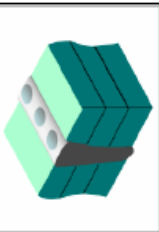
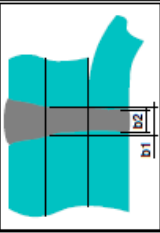
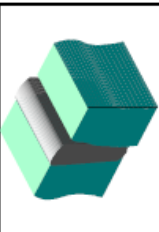
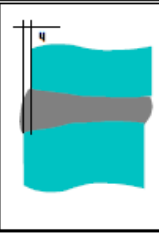
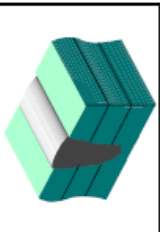
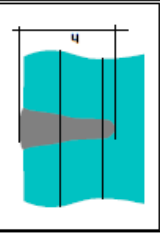
Abbildung 7-13 „Falscher Freund“	110
Abbildung 8-1 Golf 6, 2-Türer, Tür rechts.....	113
Abbildung 8-2 Zeichnungsschnittansicht Crashrohr mit Laserschweißnähten.....	114
Abbildung 8-3 Daten- und Softwarestruktur der Umsetzungsanwendung	114

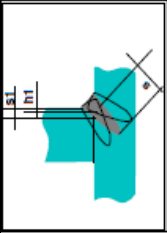
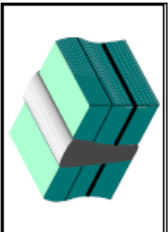
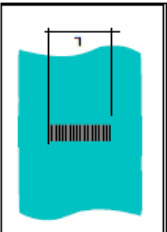
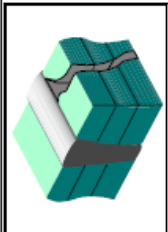
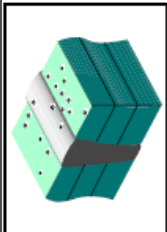
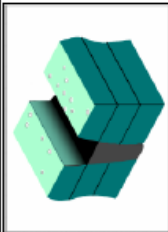
10 Anlagen

10.1 Nahtunregelmäßigkeiten an Laserschweißnähten

Fehlerart	Toleranzbereich und Grenzwerte ⁽¹⁾		Bewertung / Maßnahmen	mögliche Ursachen	Gegenmaßnahme	Relevant für.. Detektierung
Löcher						
Durchgangslöcher, einzelne Poren, "Durchschüsse"			$d \leq 2 \text{ mm}$ $d > 2 \text{ mm}$ $d_1 < 2b, d_2 < b$, wenn $a < 6d_1$ nicht im Sicht- und Dichtbereich	i.O. Nacharbeit i.O.	- schlechte Prozessparameter (Streckenenergie, Fokusslage, Prozessgas) - Schmelzendynamik	Korrosion Optik Dichtheit
Blasen in der Naht / am Nahttrand / Porenmeister			$L \leq 50 \text{ mm (20 mm)}$ $L > 50 \text{ mm (20 mm)}$ $d_2 \leq b$ und $d_3 \leq t_1$ $L < 6 d_1$ Sicht- u. Dichtbereich	i.O. Nacharbeit i.O. nicht zulässig nicht zulässig	- Prozess verlangsamen - Kanten reinigen	Korrosion Optik
Oberflächenporen			siehe "Poren"			Korrosion Optik
Anfangskrater Endkrater			$d \leq 2 b$ $d > 2 b$	zulässig Nacharbeit oder Nahtverlängerung für Sicht- Dicht- oder korrosionsgefährdete Bereiche Sondenvorgaben	ungeeignete Leistungsrampen	Festigkeit Korrosion Optik
Bindefehler						
Nahtaussetzer			nicht zulässig nach [2] außer nach Vorgabe $L \leq 20 \text{ mm}$ $L > 20 \text{ mm}$ und $\Sigma L \leq 50 \text{ mm}$ $\Sigma L > 50 \text{ mm}$ (im Bereich erhöhter Anforderung nicht zulässig)	Nacharbeit i.O. Nacharbeit i.O. Nacharbeit Nacharbeit	- Steuerung korrigieren - Prozessgasmenge nachstellen	Festigkeit Korrosion Optik

keine Verbindung			nicht zulässig	nicht zulässig / Nacharbeit	Werkstück und Spannungsnaugigkeit zu großer Spalt	exakter Spannen Naht verlegen	Festigkeit Korrosion
Binderfehler			nicht zulässig	nicht zulässig / Nacharbeit	Verschmutzung Beschichtung unebene, unpassende Fügeflächen Spaltmaßschwankung	Ursachen beseitigen	Festigkeit Korrosion
Risse Heißrisse Kaltisse Erstarungsrisse Mittlerippendefekt			nicht zulässig	nicht zulässig nicht zulässig nicht zulässig => Nacharbeit	Dickblechschweißung hochlegierte Stähle umwandelnde Stähle Materialspannungen, Abkühlverhalten Schweißzusatz Grundmaterial	- Strahlförmig ändern - V-Nahtform - Temperaturregim ändern	Festigkeit Korrosion Optik Dichttheit
Schmelzen-Deformation Nahtunterwölbung			$h_1 < 0,25 t_1$ über gesamte Naht $h_1 > 0,25 t_1$, wenn $S_N < 0,75 t_1$ Nahtverlängerung nicht zulässig, wenn $h_1 > 0,8 t_1$	zulässig nicht zulässig, Nacharbeit oder Nahtverlängerung	Spalt zu groß	- Nahtkühlung - Schnittkante	Festigkeit Optik
Wurzelrückfall			$h_3 < 0,25 t_3$ über gesamte Naht $h_3 > 0,25 t_3$, wenn $S_N < 0,75 t_3$ Nahtverlängerung nicht zulässig, wenn $h_3 > 0,8 t_3$	zulässig nicht zulässig, Nacharbeit oder Nahtverlängerung	Spalt zu groß Leistungsmodulation	- Fokusslage - Strahlförmig	Festigkeit Optik
Nahtüberhöhung			$h_1 \leq 0,2 t_1$ (über gesamte Naht)	darf auch höher sein, wenn keine Funktionsbeeinträchtigung			Optik
Wurzelüberhöhung (Nahtdurchhang)			$h_3 \leq 0,2 t_3$ (über gesamte Naht)	darf auch höher sein, wenn keine Funktionsbeeinträchtigung			Optik





Randkerbe			$h \leq 0,05 t$ (Bewertungsgruppe B)				Festigkeit Optik
Welligkeit Schuppung			z.Zt. k.A.				Festigkeit Optik
Humping			z.Zt. k.A.			Hohe Schweißgeschwindigkeit	Optik
Maßfehler Mindestnahtbreite			Mindestnahtbreiten nach Zeichnung	normal zwischen (1...2) mm			Festigkeit Passgenauigkeit
Kantenversatz			$h \leq 0,05 t$ (Bewertungsgruppe B)	kann durch Zeichnungs-angabe abweichen	schlechte Einspannung Bauteilform	- Positionierung nachstellen, ändern	Festigkeit Optik Passgenauigkeit
falsche oder variierende Einschweißtiefe			Einschweißung in unterstes Blech $\geq 0,3$ unterste Blechdicke	in Praxis wird Durchschweißung gefordert	- geringe Laserleistung - verschmutztes Schutzgas	Parameter und Anlage prüfen	Festigkeit Prüfbarkeit

Abweichung vom vorgesehenen Eindrückwinkel		$h1 \leq 0,05 s1$ (Bewertungsgruppe B)	kann durch Zeichnungs-angabe abweichen	- schlechte Bauteile Positionierung - ungenaue Werkzeug (Fokus) Positionierung	Nahtführungssystem verwenden oder Einstellparameter verbessern	Festigkeit Optik
Spalt zwischen Blechen zu groß		$a = 0,05 \text{ bis } 0,2 \text{ mm}$	abhängig von zulässiger Toleranz und Auswirkung auf andere Nahtfehler	- Bauteil Verformungen - schlechte Spanbedingungen - ungünstige Nahtanordnung	Entgasungsspalte einhalten	Festigkeit Korrosion
Falsche Nahtlänge		nur positive Toleranz zulässig L + 5 mm	Nacharbeit	Falsche Einstellung der Maschinensteuerung	- Steuerung korrigieren	Festigkeit Dichtheit
andere und optische Fehler						
Kantenansmelzung und Kerbungen			nicht zulässig / Nacharbeit	- Naht zu Randnahe - Zunder	- Nahtlage ändern - Reinigung - Prozeßgas	Festigkeit Korrosion Optik
angeschmolzene Schweißspritzer		im Flanschbereich ohne Funktionsbeeinträchtigung Sichtbereiche / Bereiche mit Karosseriebeanspruchung	zulässig nicht zulässig	zu geringer Zink Entgasungsspalt	Entgasungsspalt Gewährleisten	Korrosion Optik
Schmelzenauswürfe "Oberblech geschnitten"			nicht zulässig / Nacharbeit	- O-Spalt, dicke Beschichtungen, Starker Engasungsdruck - zu großer Spalt - zu große Streckenergie	- Spanngenaugigkeit erhöhen - Streckenergie verringern	Festigkeit Korrosion Optik
Eisarrungslunker				- Schrumpfungsbehinderung	- Nahtform	
Aufhäutungen				- Grund - oder Zusatzmaterial	- Streckenergie	

10.2 Sensor-Fehler-Übersicht

			Nahteigenschaften nach PV 6719								
			Äußere Merkmale (Tabelle 1)								
			1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7
Sensor/Verfahren			Naht vorhanden	Nahtlänge	Position/Lage	Nahtunterwölbung Wurzelrückfall	Durchgangslöcher	Endkrater	(Oberflächen-)Poren	Unterbrochene Schweißnaht	Angeschmolzene Schweißspritzer
Pre-	optische Spaltmessung	M-I									
Inprozess	Laserleistung	M-I									
	Abstand (Fokuslage)	M-I									
	Geschwindigkeit	M-I									
	Rückreflex (koaxial)	I									
	Plasma (koaxial)	I									
	"Temperatur" (koaxial)	I									
	Plasma (offaxis)	I									
	"Temperatur" nachlaufend	I									
	Körperschall (Spaltbewertung)	I(a)									
	Prozessvideo (koaxial) Keyhole	I									
	Prozessvideo (koaxial) flüssige Schmelze	I									
Postprozess	Wirbelstrom Oberraupe	P (a)									
	Wirbelstrom Wurzel	P (a)									
	Oberflächenscanner Oberraupe	M									
	Oberflächenscanner Wurzel	M									
	Thermografie	P									
	Prozessvideo (koaxial) erstarrte Schmelze	M									

"Sensor-Fehler-Übersicht" – verdeutlicht mit welchen Meß- und Prüfmethoden welche Nahtmerkmale erfassbar sind.

	keine Aussage	I	Indizienverfahren	M-I	Meßverfahren mit Indizienaussage
	sichere Aussage	P	Prüfverfahren	(a)	durch anlernen eindeutigere Aussagen
	bedingte Aussage	M	Meßverfahren		Dissertationsschwerpunkt

10.3 Fehler-Ursachen-Parameter

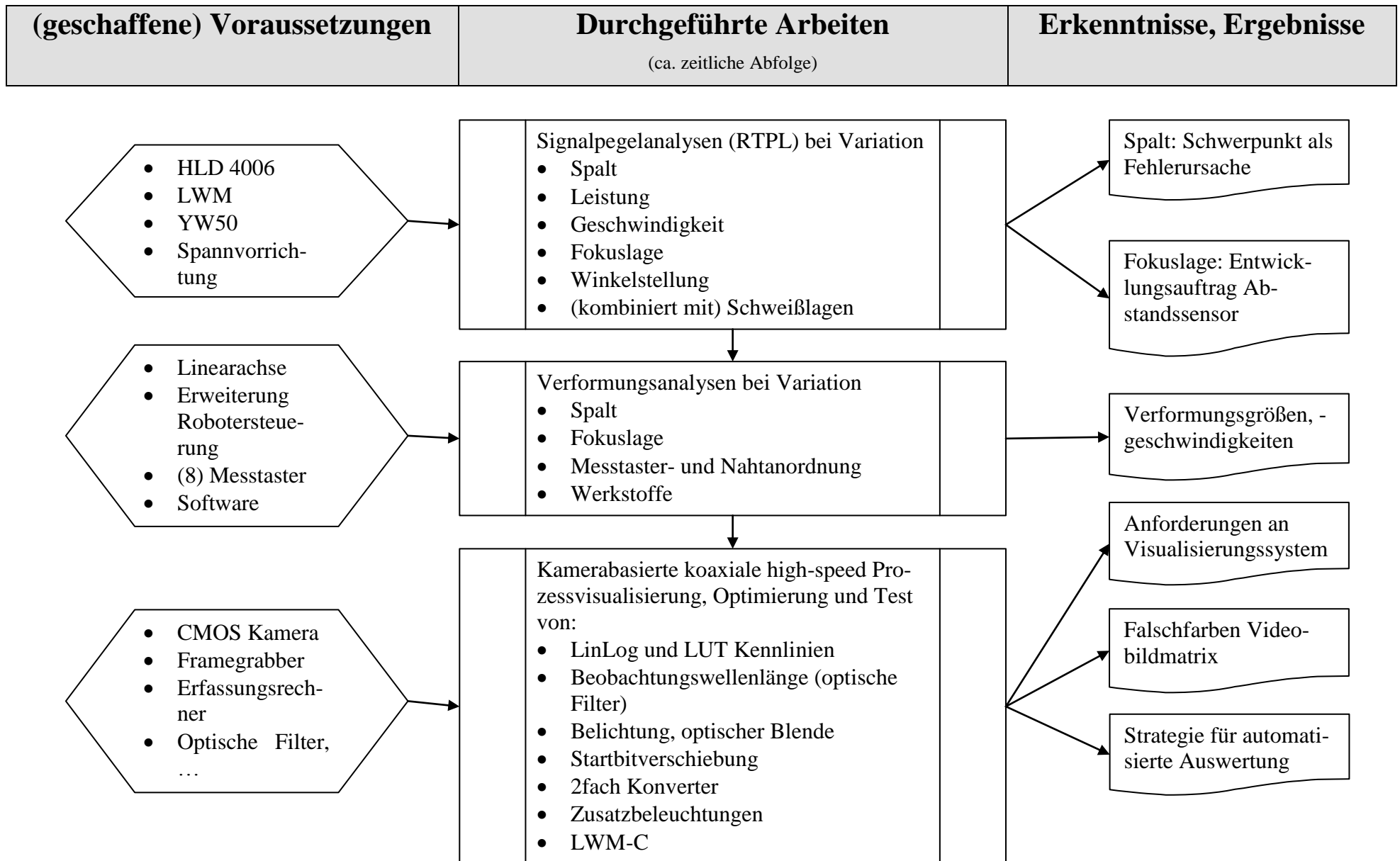
	Laser – Stahlführung –formung – BK								Führungssystem			Vorrichtung		
mögl. Ursache	Laserleistung / Auskopplung	Leistungsverluste im System (Faserkopplungen, Kollimation etc.)	Laserleistung / Werkstück	Fokusslage	Fokussdurchmesser	Kaustik	Intensitätsverteilung /Werkstück	Brennweite	Schweißgeschwindigkeit	Führungsgenauigkeit	Startposition, Steuerungsnullpunkt	Fokusslage	Bauteillage, Fixierung	Spalt
Fehler														
Löcher														
Durchgangslöcher ("Durchschüsse")	+4		+4				+5		-4					+2
Blasen in der Naht / am Nahttrand / Porennester				2		+2			+3	3		2		-2
Oberflächenporen				2		+2			+3	3		2		-2
Bindefehler														
Nahtaussetzer	-1	-4	-4	3	3	3	3		+4	5		3	5	2
keine Verbindung	-1	-4	-4	3	3	3	3		+4	5		3	5	2
Bindefehler	-1	-4	-4	3	3	3	3		+4	5		3	5	2
Risse														
Heißrisse Kaltrisse Erstarrungsrisse Mittelrippendefekt			1	1	1	1	1		2			1	4	
Schmelzen-Deformation														
Nahtunterwölbung	+4		+4				+4		-2					+3
Wurzelrückfall	-3	+3	-3	+2	+1	+1	+3		+2			+2		
Nahtüberhöhung														
Wurzelüberhöhung (Nahtdurchhang)	+4		+4				+4		-2					+3
Randkerbe				2	1	1	1			+4		2		
Welligkeit (Humping)					-2				+4					
Schmelzauswürfe									+2					-5
Maßfehler														
Mindestnahtbreite	-3	-3	-3		-3	2	-3		+3					
Kantenversatz													+5	
falsche oder variierende Einschweißtiefe	3	3	3	3	2	2	2		2			3	1	
Abweichung vom vorgesehenen Eindringwinkel										5				
Spalt zwischen Blechen zu groß													5	5
Falsche Nahtlänge											5			
Teilkontur ausserhalb der Toleranz														
andere und optische Fehler														
Endkrater	1										5			
Kantenanschmelzung und Kerbungen														
angeschmolzene Schweißspritzer														-5
Aufhärtungen									+2					

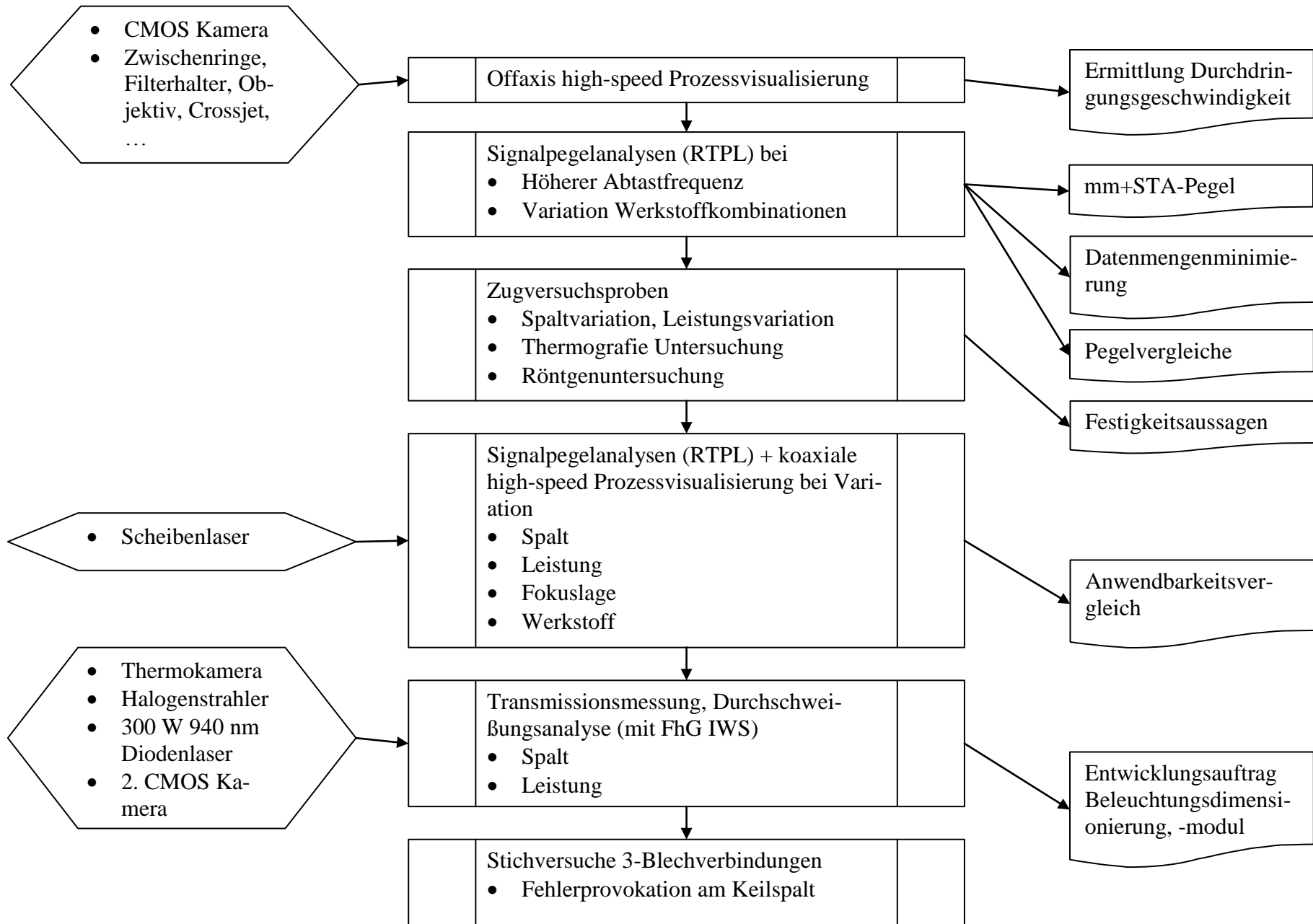
Gaszuführung		Konstruktion, Technologie										Sonstiges			
Schutzgasvolumenstrom	Cross-Jet	Geometrie	Zugänglichkeit	Schweißkontur	Schweißnahtfolgen	Nahtlage	Nahtart	Spaltbreite	Werkstoff	Oberflächenbeschichtung / Schichtdicke	Taktzeiten	Schweißzusatzwerkstoffgeschwindigkeit	Zusatzwerkstoffart	Oberflächenbefettung	Fremdstoffe (Verschmutzung)
-2								+2	-2						
-2								-2		+3				+5	+5
-2								-2		+3				+5	+5
-2														+4	+3
-2														+4	+3
-2														+4	+3
-2							2		5	1			4		
-2															
														3	3
								-5		+5					
				2	2										
-2									1	1					
							4								
		5						5							
		5													
															4
								-5	1	3					
								+3	+2						

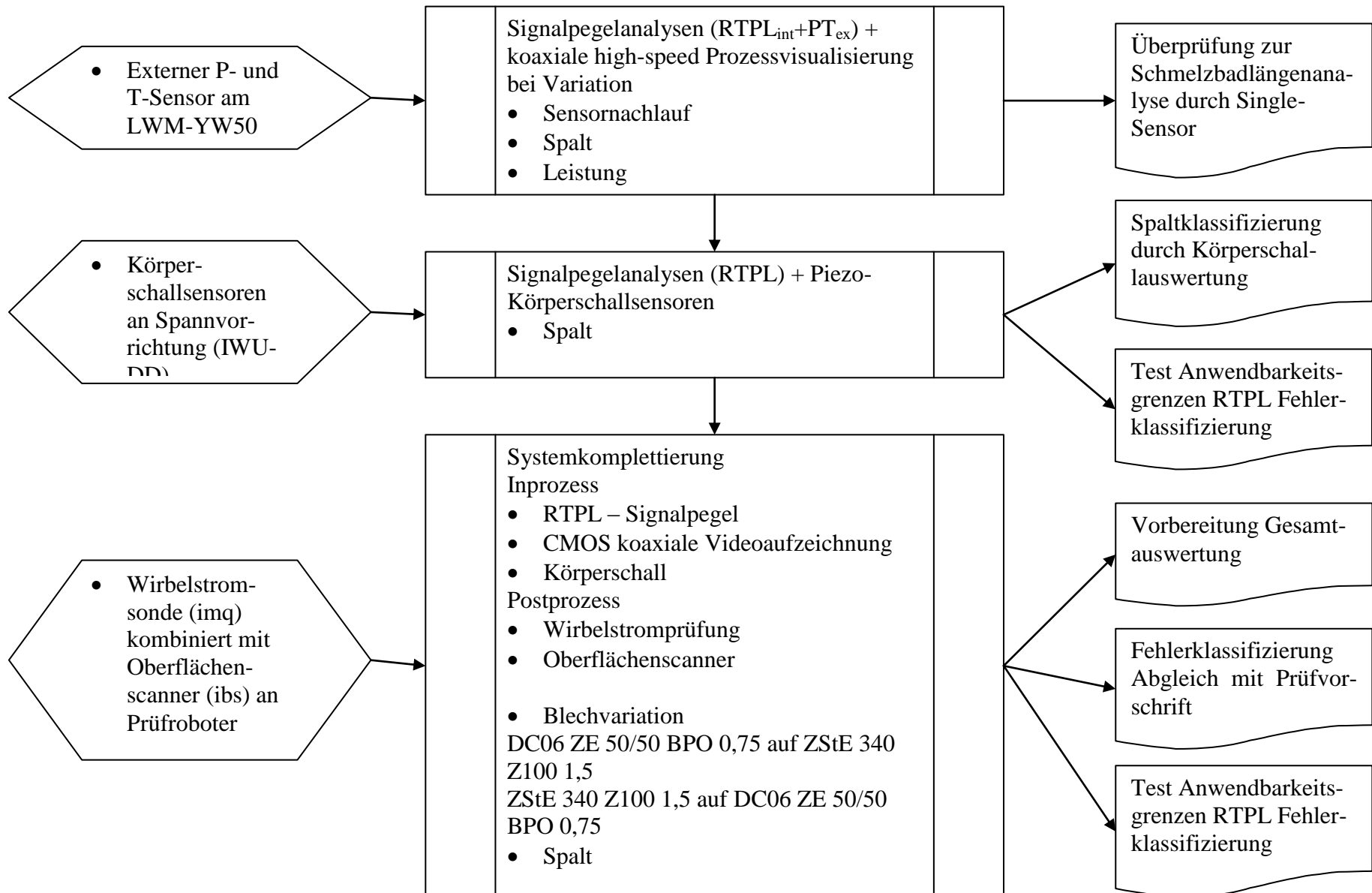
Lesehinweise:

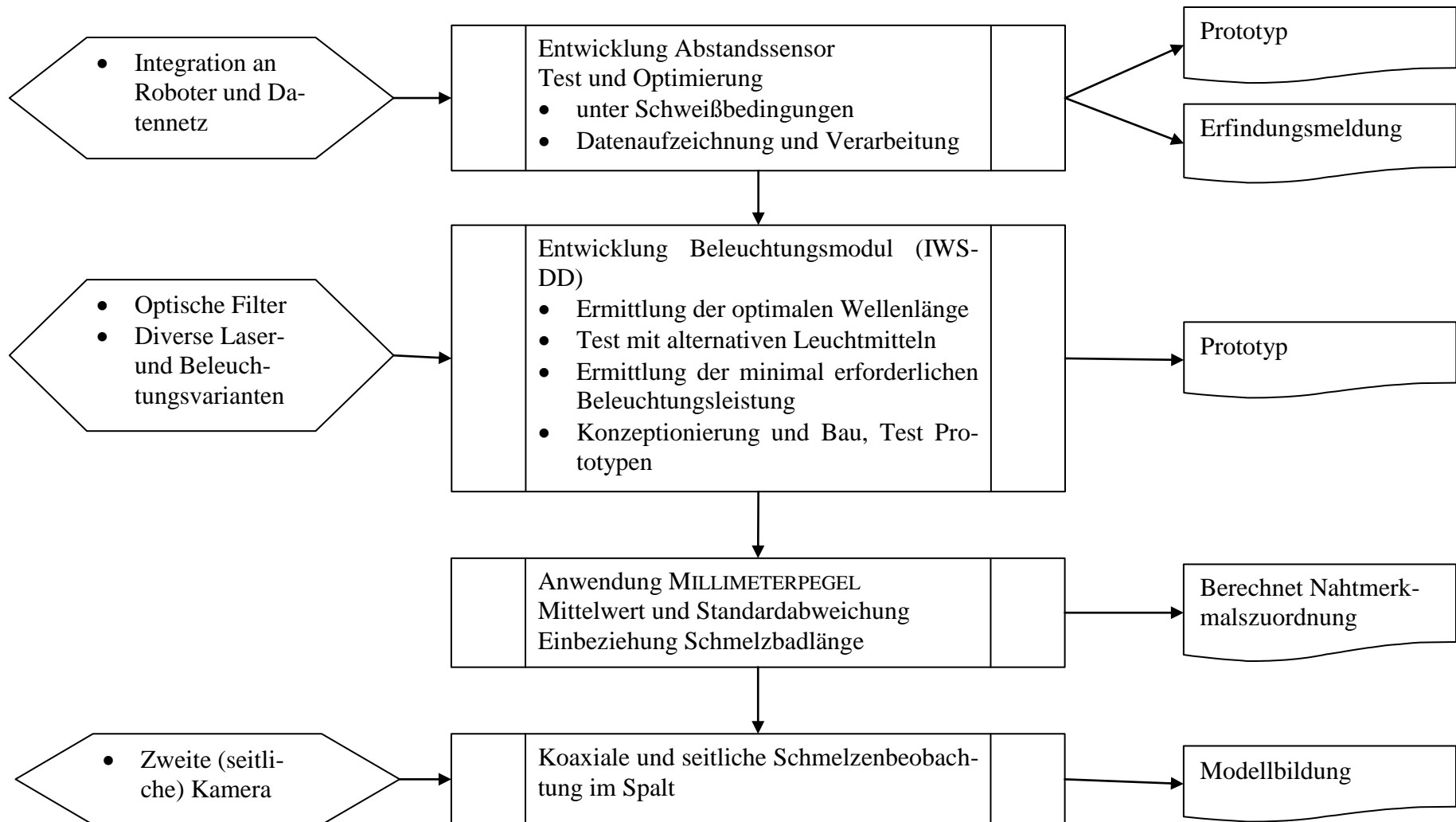
Die Zahlen bedeuten eine Bewertung der möglichen Fehler Ursachen, von 1 wenig relevant bis 5 sehr relevant. Positives oder negatives Vorzeichen bedeuten eine zusätzliche Bewertung hinsichtlich einer meßbaren Größe, bspw. (+) zu großer Spalt, Intensität, (-) zu kleiner Spalt, Intensität.

10.4 Arbeitsplan – Versuchsabfolge und Resultate









Thesen

Der Schwerpunkt der Arbeit war die Analyse von Vorgängen im Laserschweißprozess und dessen Zusammenhänge mit Prozessemissionen der Nahtform I-Naht am 2-Blech-Überlappstoß von verzinkten Stahl-Karosserieblechen, um Merkmals- bzw. Fehlerklassifikationen zu ermöglichen.

Die Untersuchungen zur Erarbeitung der experimentell-phänomenologisch abgesicherten Bewertungsmethode zur Prognose entstehender Schweißnahtmerkmale zeigten:

1. Hauptstörgrößen des Laserschweißprozesses sind die geometrischen Lage- und Formabweichungen der zu verschweißenden Bleche und deren Einflüsse auf den Spalt zwischen den zu verschweißenden Blechen.
2. Toleranzen der Laser- und Anlagentechnik, die sich auf die Schweißgeschwindigkeiten, Fokusslage und Laserleistung am Werkstück auswirken, sind mit organisatorisch-technischen Maßnahmen beherrschbar.
3. Schweißverzug ist eine nur bedingt vorher berechenbare Störgröße. Die Streuung des realen Schweißverzuges, dessen sofortigen und verzögerten Auswirkungen auf die Bauteilgeometrien in den Schweißstellen, rechtfertigen den Einsatz von Qualitätsüberwachungssystemen.
4. Der minimal zulässige Spalt, der zur Erzielung qualitativ guter Schweißnähte nicht unterschritten werden sollte, ist von den Beschichtungen der Bleche abhängig.
5. Der maximale zulässige Spalt, der zur Erzielung qualitativ guter Schweißnähte nicht überschritten werden sollte, ist von den Einzelblechdicken, dem tolerierbaren Nahteinfall und der damit verbundenen Mindestanbindungsbreite abhängig.
6. Das Prozessfenster zur Erzielung qualitativ guter Schweißnähte nimmt zu mit steigender Blechdicke und abnehmender Beschichtungsdicke.
7. Die Formen der Inprozess-Signalkurven (Rückreflex, Temperatur, Plasma), aufgetragen in der Abhängigkeit von der Spaltgröße, gleichen jeweils einander auch bei unterschiedlichen Schweißpositionen und Werkstoffen.
8. Die für die Bewertung eingeführten Millimeterpegel der erfassten Prozessemissionen ermöglichen trotz reduzierter Datenmenge übersichtliche, örtlich hinreichende und qualitative Aussagen der Nahtmerkmale.
9. Die erstarrende Schmelze bildet die verbleibenden Nahtmerkmale aus. Das Verhalten, die Form und Länge der flüssigen Metallschmelze hängt von der Spaltgröße und der verflüssigten/verdampfenden Oberflächenbeschichtung ab.
10. Kenntnisse über das Schmelzenverhalten bei den Merkmalsausprägungen und die Beobachtung der Schmelze während dem Schweißen mit Zusatzbeleuchtung sind wichtige Bausteine für eine Bewertungsmethode.
11. Aus den 7 Signalen: 1. Rückreflex-mm-Mittelwert, 2. Rückreflex-mm-Standardabweichung, 3. Temperatur-mm-Mittelwert, 4. Temperatur-mm-Standardabweichung, 5. Plasma-mm-Mittelwert, 6. Plasma-mm-Standardabweichung und 7. obere Schmelzbadlänge sind mit je nur einem Schwellwert die 6 Nahtmerkmale: I. hohe Spritzerwahrscheinlichkeit, II. Naht in Ordnung, III. geringer Nahteinfall, IV. starker Nahteinfall, V. oben geschnitten und VI. unverschweißte Naht („Falscher Freund“) ermittelbar.
12. Mit der Ergänzung der bestehenden Vorstellungen des Laserstrahl-Tiefschweißens im Einschweißmodell durch die variable Störgröße Spalt beim Verschweißen im Überlappstoß sind die Zusammenhänge zwischen Störgröße, Prozessemissionen, Schmelzenverhalten und Nahtmerkmalen erklärbar.

Lebenslauf



Geburtsdatum, -ort	27. April 1966, Berlin
Familie	eine Tochter
Schulbildung	1972-1982: Zehnklassenschule 1986-1987: Abitur an der Technischen Hochschule Zwickau
Berufsausbildung	1982-1985: Lehre zum Facharbeiter für Fertigungsmittel
Wehrdienst	1985-1986
Direktstudium	1987-1992: Ingenieurstudium Fertigungsmittelentwicklung im Fachbereich Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion der Technischen Hochschule Zwickau
Fernstudium	2001-2003: Fernstudium Lasertechnik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena
Doktorand	Seit November 2005 externer Industrie Doktorand an der Fakultät Maschi- nenwesen der TU Dresden

Berufserfahrung

Seit April 2003 – Volkswagen Sachsen GmbH

Projektingenieur Lasertechnologie / Serienplaner

November 1999 bis März 2003 – SAM GmbH Zwickau

Konstrukteur / Applikationsingenieur Lasertechnik

Mai 1998 bis Oktober 1999 - Multi-Industrie- und Kühlanlagenbau GmbH

Konstrukteur / Technischer Leiter / EDV-Verantwortlicher im Geschäftsbe-
reich Kühltssysteme

Mai 1995 bis Februar 1998 - SRH-LAUER GmbH Wiesenburg

Konstrukteur / Technischer Leiter / EDV-Verantwortlicher im Geschäftsbe-
reich Kühltssysteme

Oktober 1994 bis April 1995 - WUTZLER GmbH

Technischer Leiter im Metallbau

September 1992 bis Oktober 1994 - Industriekühlung Zwickau GmbH

Konstrukteur / EDV-Verantwortlicher / Vertrieb

Mai bis September 1992 - IVM Engineering Joint-Venture GmbH Chemnitz

EDV-Dozent